

# **Terrestrisches Laserscanning zur Quantifizierung von Trennflächenparametern für statistisch signifikante Discrete-Fracture-Network-Modelle**

**Dissertation**

Vom Fachbereich Material- und Geowissenschaften  
der Technischen Universität Darmstadt  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)  
genehmigte Dissertation



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

von  
M.Sc. Dennis Laux  
geboren am 26.02.1984 in Düsseldorf, Nordrhein-Westfalen

Referent: Prof. Dr. Andreas Henk  
Korreferent: Prof. Dr. Christoph Hilgers

Darmstadt 2017

D 17

---

---

**Tag der Einreichung: 28.07.2016**

**Tag der Disputation: 09.12.2016**

Vorsitzender der Prüfungskommission:	Prof. Dr. Hans-Joachim Kleebe	Technische Universität Darmstadt
Referent:	Prof. Dr. Andreas Henk	Technische Universität Darmstadt
Korreferent:	Prof. Dr. Christoph Hilgers	Karlsruher Institut für Technologie
Prüfer:	Prof. Dr.-Ing. Matthias Becker	Technische Universität Darmstadt
Prüfer:	Prof. Dr. Christoph Schüth	Technische Universität Darmstadt

---



## I. Zusammenfassung

Die Erfassung und Charakterisierung von Trennflächen in geologischen Aufschlüssen ist eine wichtige Aufgabe von Geowissenschaftlern. Da die klassische, händische Messung von Trennflächenparametern zeitintensiv ist, löst das terrestrische Laserscanning diese Methode ab. Das terrestrische Laserscanning erlaubt die Erfassung von Oberflächenstrukturen und deren Darstellung als dreidimensionale Punktwolken. Innerhalb dieser Punktwolken ist die Quantifizierung geometrischer Trennflächenparameter wie Orientierung, Größe sowie der Häufigkeit (Intensität) der Trennflächen möglich. Dazu werden bestehende, oft manuelle Auswertemethoden verbessert, um eine möglichst weitgehende Automatisierung der Arbeitsschritte zu erreichen, sowie neue Methoden entwickelt, die bestehende händische Messverfahren als Grundlage haben. Die semi-automatische Auswertung der Orientierung, Größe und Intensität aus Datensätzen, die mit einem Laserscanner erfasst werden, ist in dieser Arbeit beschrieben. In den vorgestellten Arbeitsprozessen ist der manuelle Input eines Bearbeiters auf ein Minimum abgesenkt. Beispieldatensätze dreier Aufschlüsse zeigen, wie die kontrollierenden Parameter der genutzten Algorithmen zur Quantifizierung der Trennflächen auf das Ergebnis Einfluss nehmen und Ergebnisse optimiert werden können. Eine zentrale Rolle spielt dabei die Identifizierung von Flächen inklusive Informationen über Ausmaß und Orientierung dieser Flächen auf der Grundlage eines RANSAC-Algorithmus. Darauf basierend entwickeln sich weitere geometrische Berechnungsschritte zur Abschätzung der Trennflächencharakteristika. Es werden unterschiedliche Herangehensweisen beschrieben und schlussendlich wird eine Bearbeitungsempfehlung gegeben. Die Orientierungsanalyse beruht auf der Identifizierung von Normalenvektoren auf der Oberfläche über zwei unterschiedliche Ansätze, eine direkte, umfassende Normalenberechnung auf der Wolke oder der vorhergehenden Identifizierung einer Fläche und ihrer Orientierung. Eine zentrale Rolle spielt dabei die Identifizierung von unterscheidbaren Scharen innerhalb der Ergebnisse mithilfe eines k-means oder ISIS-Algorithmus<sup>4</sup>. Als komplex erweist sich die Quantifizierung der Größe von Trennflächen, bei der sich die Angabe der maximal-erkennbaren Ausdehnung einer Fläche im Aufschluss als brauchbar erweist. Geometrische Überlegungen führen von diesem Ausdehnungswert über Umrechnungen auf eine Größe, wobei diese für unterschiedliche Formen (Kreise, Ellipsen und Rechtecke) angenähert wird. Die Intensität wird über die Adaption der Scanline-Methode auf Punktwolken ermittelt, wobei einzig Anfang- und Endpunkt einer Vielzahl von Scanlines vorgegeben werden muss.

Mehrere Trennflächen und ihre Verschneidung zu einem Trennflächennetzwerk (bzw. Kluftnetzwerk) spielen eine wichtige Rolle bei der Bewertung von natürlich geklüfteten Reservoirgesteinen. Dort kontrolliert das Netzwerk maßgeblich die Durchflusseigenschaften eines Fluids. Ein detaillierter Einblick in das Netzwerk und dessen lokale Variationen erlaubt genaue Prognosen über ein Reservoir während der Produktionsphase. Die geringe Datendichte von Reservoiren kann über Reservoiranaloge an der Erdoberfläche (Aufschlüsse, Minen und Tunnel) erhöht werden. Hier liefert das terrestrische Laserscanning einen wichtigen Beitrag, denn so kann eine hohe Anzahl an Daten in kurzer Zeit generiert werden. Die Ergebnisse unserer Methoden werden so dargestellt, dass sie in ein DFN Modell übertragen werden können, das genutzt wird, um Prognosen über Fluideigenschaften im Kluftnetzwerk durch das Aufskalieren hydraulischer Parameter wie der Permeabilität treffen zu können. Erfolgreich werden diese Parameter auf Grundlage der aus den Punktwolken quantifizierten Daten erstellt und deren hydraulische Eigenschaften evaluiert. Aufgezeigt wird die Sensibilität der Modelle auf die Trennflächenintensität, die maßgeblich das Durchflussverhalten bestimmt. Zusätzliche Anwendungsmöglichkeiten von DFN Modellen ergeben sich für geomechanische Berechnungen des E-Moduls, das ebenso maßgeblich von der Intensität abhängt, der Stabilität einer Felswand oder der Ermittlung der durchschnittlichen Blockgrößen aus 3 Trennflächenscharen. Die große Datenbasis erhöht die statistische Signifikanz dieser Modelle und aller berechneten Ergebnisse. Zudem bietet das terrestrische Laserscanning die Möglichkeit lokale Variationen entlang eines Gesteinskörpers zu erfassen und ebenfalls in ein Modell einzubauen.

## II. Abstract

Surveying and characterisation of fractures in geological outcrops play a major important role in geosciences. Since traditional, manual measuring of fracture parameters still remain very time consuming, the terrestrial laser scanning approach (TLS) is used instead. This approach enables a complete surface structure surveying and creates three-dimensional point clouds. Within these point clouds a quantification of geometric fracture parameters is possible, e.g. the orientation, size and intensity of fractures. Former approaches of identifying fracture parameters from point clouds are improved and each working step automated as far as possible. Furthermore, new methods are developed, which mostly rest upon manual measurement methods. The semi-automated evaluation of orientation, size and intensity from laser scanning data is described in this thesis. The presented processes minimize the manual input of the interpreter. Three different example outcrops are analyzed to proof the methods and to show the role of controlling parameters of each used algorithm, which are applied to quantify the fractures. A satisfying identification of planes within the point clouds is the key for success. Planes are recognized by a RANSAC-Algorithm. Based on this further geometrical calculations lead to estimation of fracture characteristics. Different approaches are described and a recommendation, which way to use, is given in the end. The analysis of orientation is based upon normal vectors, which are calculated by fully calculate normal vectors within the complete point cloud or by a prior identification of planes and following their orientation. High importance is given to the evaluation of clusters within the data by using a k-means or ISIS-algorithm. Size determination of fractures remains very complex, the measurement of the maximum, visible extend of a fracture in the outcrop is useful. The maximum extend is used to estimate fracture sizes mathematically for different assumed fracture shapes (either circle, ellipse or rectangle). For intensity analysis the Scanline-method is adopted to the point clouds. Only start and end point of each scanline has to be determined.

Different fracture sets create a fracture network. They are playing a major role for the evaluation of natural fractured reservoir rocks. The network controls the fluid flow in these reservoirs. Detailed knowledge of these networks and there lateral variations allows comprehensive prediction during the production phase. The low data base of reservoirs can be enhanced by the use of reservoir analogues at the surface (tunnels, mines, outcrops). Here, the terrestrial laser scanning contributes by delivering a large amount of data from these outcrops. Results of fracture analysis are presented as a Discrete-Fracture-Network (DFN-) model, which are used to predict fluid flow and to upscale hydraulic parameters as the permeability from fracture data. Terrestrial laser scanning data are successfully used to build up DFN models and estimate hydraulic properties. Sensitivity of the models to fracture intensity are shown, which strongly influence fluid flow behavior. Further applications of DFN models are geomechanical upscaling of young's modulus, which likewise depend mainly on fracture intensity, estimation of slope stability and stability of tunnel projects and the calculations of rock block sizes limited by fracture network. The great amount of data enhanced the statistical significance of these DFN Models and all calculated results. Furthermore, terrestrial laser scanning allows to picture local variations along an outcrop wall and to implement them into the model afterwards.

### III. Danksagung

An erster Stelle danke ich Prof. Dr. Andreas Henk für die Möglichkeit der Promotion und Bearbeitung dieses Themenbereichs. Seine Betreuung dieser Arbeit; seine stete Ansprechbarkeit und Unterstützung waren dabei immer herausragend. Seine vielen hilfreichen Ratschläge und Antworten sicherten ein kontinuierliches Fortschreiten dieser Dissertation. Zudem ließ er mir genügend Freiräume eigene Ansätze zu entwickeln und vielfältige Erkenntnisse rund um das Themenfeld der Dissertation zu sammeln.

Prof. Dr. Christoph Hilgers danke ich für die Übernahme des Korreferats und die erste Einführung in das Themenfeld dieser Dissertation durch das Begleiten meiner Master-Thesis, in der ich die Grundlagen der Thematik „Laserscanning“ erlernen konnte.

Ich denke der Firma Riegl LMS GmbH, Horn (Österreich), und insbesondere Thomas Gaisecker für die Einführung in den genutzten Laserscanner sowie die Unterstützung bei der Aufnahme einiger Aufschlussbeispiele.

Ich danke Golder Associates und insbesondere Mark Cotrell für die Bereitstellung der Software Fracman, die eine umfangreiche Analyse meiner Daten ermöglichte.

Ein wesentlicher Bestandteil meiner Dissertation waren Geländearbeiten und anregende geologische Fachdiskussionen, die der Entwicklung der Methodik vorausgingen. Für eine rege Teilnahme und tatkräftige Unterstützung daran danke ich meinen Kollegen Christian Heinz, Karsten Fischer, Reimund Rosmann, Christoph Wagner und Bastian Weber. Ich danke zudem Stefanie Kollmann für die Hilfestellungen in allen verwaltungstechnischen und sonstigen Fragen, die sich rund um meine Dissertation und während meiner Arbeit am Institut und in der Arbeitsgruppe Ingenieurgeologie ergeben haben. Ich danke weiterhin meinen Kollegen am Institut für hilfreiche Kommentare, Gespräche und Unterstützung, insbesondere Achim Aretz, Chiara Aruffo, Kristian Bär, Constantin Haug, Tobias Hergert, Petra Kraft, Karsten Reiter und Ulrike Simons.

Ich danke den Masterstudenten Lothar Koch, Sebastian Kurka, Benjamin Schmitz und Stefan Wewior, die in ihren Abschlussarbeiten neue Erkenntnisse und interessante Einblicke und Anregungen aus Anwendungsbereichen des terrestrischen Laserscannings beisteuerten.

Ohne meine Familie, meinen beiden Brüder und meiner Mutter, die mich stets in meinen Entscheidungen unterstützen und tolerieren, wäre die Promotion nicht möglich gewesen.

Für viele aufbauende Worte und seelische Unterstützung danke ich meiner Freundin Tina, die nie den Glauben und das Vertrauen in mich verlor, ihr Verständnis und ihre Liebe.

### IV. Inhaltsverzeichnis

I.....Zusammenfassung	III
II. ....Abstract	IV
III. ...Danksagung	V
IV....Inhaltsverzeichnis	VI
V. ....Symbolverzeichnis	X
VI....Abkürzungsverzeichnis	XV
VII. .Abbildungsverzeichnis	XVI
VIII. Tabellenverzeichnis	XXVII
1 .....Motivation	1
2 .....Grundlagen	3
2.1 Charakterisierung von Trennflächen	3
2.2 Raumlage	4
2.2.1 Darstellung der Orientierungen	4
2.3 Schar	4
2.3.1 Einteilung in Scharen (Clusteranalyse)	4
2.4 Persistenz	7
2.5 Geometrie	7
2.5.1 Form von Trennflächen	7
2.5.2 Größe von Trennflächen	8
2.5.3 Kluftspurlänge	9
2.5.4 Korrelation von Längen mit zugrundeliegender Kluftgröße	9
2.5.5 Aufnahme und Berechnung der Kluftspurlängen	10
2.5.6 Berechnung der kreisförmigen Kluftgröße	13
2.5.7 Berechnung der elliptischen Kluftgröße	13
2.5.8 Überprüfung der Ergebnisse	15
2.5.9 Berechnung der rechteckigen Kluftgröße	16
2.5.10 Verzerrung bei Messung der Kluftgrößen	17
2.6 Abstand	18
2.7 Intensität	18
2.7.1 Quantifizierung des Ausmaßes des Trennflächengefüges	18
2.7.2 Scanline-Methode	21
2.7.3 Areal Mapping Methoden	21
2.8 Matrixblockgröße	22
2.8.1 Durchschnittliche Blockgröße und Rohblockhöflichkeit	23
2.9 Typ	24
2.9.1 Trennflächenogenese	25
2.9.2 Bruchkriterium	25
2.9.3 Klüfte	30
2.9.4 Kluftklassifizierung	31
2.9.5 Störungen	32
2.10 Rauigkeit	33
2.11 Apertur	33

---

2.12	Termination	33
2.13	Zementierung	34
2.14	Kluftwandstärke	34
2.15	Durchflussrate	34
2.16	Festigkeit von Klüften	34
3.....	Terrestrisches Laserscanning (TLS)	36
3.1.1	Technische Grundlagen und Funktionsweise eines terrestrischen Laserscanners	36
3.1.2	Verwendung des TLS in den Geowissenschaften	38
3.2	Software	38
3.2.1	RiSCAN Pro	39
3.2.2	MeshLab	39
3.2.3	CloudCompare	39
3.2.4	SplitFX	39
3.2.5	R	39
3.2.6	Fracman	39
3.3	Aufbereitung der TLS Daten	39
3.3.1	Aufnahme im Gelände	39
3.3.2	Registrierung der Punktwolke	40
3.3.3	Entfernen von Vegetation und Artefakten	40
3.3.4	Triangulation der Daten	41
3.3.5	Praktische Hinweise	42
4.....	Aufschlussanaloge	43
4.1	Übersicht und Geologie der Aufschlüsse	44
4.1.1	Römersteinbruch	45
4.1.2	Rockenau	48
4.1.3	Eberstadt	51
5.....	Methodik	58
5.1	Orientierung	58
5.1.1	Bestimmung der Orientierung mittels Plane-Patch-Filter	62
5.1.2	Bestimmung der Orientierung mittels eines RANSAC-Algorithmus	72
5.1.3	Diskussion	75
5.2	Größe	77
5.2.1	Kluftgröße aus Punktwolken	77
5.2.2	Berechnung der Länge über eine Triangulation	78
5.2.3	Identifizierung von Flächen in Punktwolken durch einen RANSAC-Algorithmus	80
5.2.4	Berechnung der Parameter $h_{\max}$ und $l_{\max}$	81
5.2.5	Quantifizierung der Kluftgröße am Beispielaufschluss	81
5.2.6	Quantifizierung der Kluftgröße aus konstruierten Kluftspurlängen	95
5.2.7	Berechnung der Trennflächengröße aus Kluftspurlängen	100
5.2.8	Zusammenfassung der erreichten Ergebnisse	105
5.2.9	Diskussion	106
5.3	Intensität	113
5.3.1	Auswertung der Intensität in Punktwolken	113
5.3.2	Berechnung des $P_{32}$ Wertes aus $P_{10}$ Daten	120

---

5.3.3	Quantifizierung der Intensität am Beispielaufschluss	123
5.3.4	Diskussion	130
5.3.5	Visualisierung der Kluftintensität	131
6.....	DFN Modellierung	134
6.1	Reservoirtypen	134
6.2	Geklüftete Reservoirre	135
6.3	Reservoirmodellierung	136
6.3.1	Äquivalente Kontinuums Modelle	137
6.3.2	Discrete Fracture Network Modelle	137
6.3.3	Aufbau und Eingabeparameter eines DFN Modells	139
6.3.4	Arbeitsablauf	139
6.3.5	Deterministische Dateneingabe	140
6.3.6	Stochastische Dateneingabe	141
6.3.7	Erweiterung der DFN-Eingabedaten durch TLS	141
6.4	Simulation/Modelle mit Fracman	141
6.4.1	Modellerstellung in Fracman	142
6.4.2	Berechenbar in Fracman	142
6.4.3	Einheiten in Fracman	142
6.4.4	Manuelle Überprüfung der Verteilungen in Fracman	144
6.4.5	Ermittlung der Orientierung von Klüften in Fracman	144
6.5	Aufskalierungsprozesse	149
6.5.1	Oda Methode	149
6.5.2	Sigma Faktor	152
6.5.3	Aufskalieren geomechanischer Parameter	152
6.5.4	Block K – Dynamisches Aufskalieren	155
6.6	Das DFN Modell von Eberstadt	156
6.6.1	Quantifizierte Inputparameter des DFN Modells	157
6.6.2	DFN Modelltest in Fracman	166
6.6.3	Hydraulische Berechnungen aus dem DFN Modell Eberstadt	168
6.6.4	Einfluss variierender Inputparameter	178
6.6.5	Geomechanische Berechnungen	180
6.6.6	Stabilitätsanalysen	186
6.6.7	Blockgröße aus DFN Modellen	194
6.6.8	Blockgrößen in Fracman	194
7.....	Diskussion	200
7.1	Zusammenfassende Diskussion der Methodik	200
7.1.1	Orientierung	201
7.1.2	Größe	201
7.1.3	Intensität	201
7.2	Verzerrung bei der Aufnahme von Trennflächenparametern	202
7.3	Verzerrung in den Ergebnissen dieser Arbeit	203
7.4	Durch TLS identifizierbare Trennflächenparameter	204
7.5	Fehlende Trennflächenparameter	204
7.6	Zusammenfassende Diskussion der DFN Modelle	205

8.....	Perspektiven der TLS-Anwendung	206
8.1	Volumenbestimmung	206
8.2	Lithologiebestimmung	207
8.3	Rauigkeit	207
9.....	Fazit	211
10....	Literaturverzeichnis	213
11....	Anhang	220
11.1	Verzeichnis der Anhänge	220
11.2	Inhalt DVD	220

## V. Symbolverzeichnis

$\mu(h)_l$	Mittelwert der Kluftspurlängen aus Window Mapping
$\mu, \eta_f$	Viskosität Fluid
$\mu_a$	Mittelwert der Hauptachsenlänge einer Ellipse
$\mu_D$	Mittelwert der abgeschätzten Kreisdurchmesser
$\mu_l$	die durchschnittliche Kluftlänge („mean trace length“)
$\hat{\mu}_l$	die durchschnittliche Kluftlänge einer Stichprobe
$\mu_r$	Koeffizient der internen Reibung
$\mu_s$	Schermodul
$A$	Vektor zur Ortsbestimmung
$A$	Fläche Kluft
<b><math>a, b</math></b>	Vektoren eines Blocks
$a, b, c$	Regressionskoeffizienten
$A_E$	Fläche Ellipse
$a_e$	Längsachse Ellipse
$A_k$	Fläche Kreis
$A_{KF}$	Flächeninhalt Kontaktfläche
$A_Q$	Fläche Quadrat
$A_R$	Fläche Rechteck
$A_S$	Flächeninhalt Kluft
$A_z$	Fläche Zellwand
$b$	Apertur Kluft
$b_e$	Querachse Ellipse
$B_N$	Kluft-Normalkomplianz
$B_R$	Breite rechteckiger Trennfläche
$B_T$	Kluft-Scherkomplianz
$\vec{B}$	Vektor zur Ortsbestimmung
$C$	Kompressibilität
$c$	Kohäsion
$c$	Radius eines runden Beprobungsfensters
$C_{I3}$	Umwandlungsfaktor
$C_f$	Kluftkompressibilität
$\vec{C}$	Ortsvektor der Ebene
$c_{ijkl}$	Tensor der 4ten Stufe
$c_L$	Lichtgeschwindigkeit
$C_m$	Matrixkompressibilität
$COV$	Variationskoeffizient
$(COV_i)_m$	Variationskoeffizienten der gemessenen Kluftspurlängen
$C_S$	Steifigkeitstensor
$C_w$	Kompressibilität Fluid
$CWM$	Circular Window Mapping
$d$	Euklidischer Abstand
$d(korr)$	Korrigierter euklidischer Abstand
$dA$	Die Einheitswinkelfläche um ein Clusterzentrum
$d_c(X_i, v_j)$	Distanz zu Clusterzentrum
$d_k$	Durchmesser der Kreise
$d_{TLS}$	Distanzwert Laserscanner
$E$	Ebene
$E$	Elastizitätsmodul
$E(a)$	Moment der Hauptachsenlängenverteilung
$E(a^4)$	4tes Moment der Hauptachsenlängenverteilung
$E(d)$	Moment der Kreisdurchmesserverteilung



---

$E(d^4)$	4tes Moment der Kreisdurchmesserverteilung
$E(l)$	Moment der Kluftspurlängenverteilung
$E(l^3)$	3tes Moment der Kluftspurlängenverteilung
$E(n,r)$	Dichtefunktion der Verteilung des Normalenvektors
$E_G$	E-Modul Gebirge
$E_r$	Ausgleichsebene
$E_T$	E-Modul Trennflächen
$F$	Gefügetensor
$f(l)$	wahre Verteilung von Kluftlängen
$F_{ij}$	Klufttensor
$f_{lh}$	Verhältnis Länge zu Höhe einer Fläche
$F_r$	Zufälliger Punkt auf Fläche
$G$	Schermodul
$g$	Intensitätsradius
$g(a)$	Verteilung der Hauptachsenlängen der Klüfte
$g(D)$	Verteilungsfunktion der Durchmesser der Kreise
$g(l)$	Verteilung der gemessenen Kluftlängen
$G_g$	Schermodul Gebirge
$H$	Höhe Kluft
$\nabla h$	Hydraulischer Gradient
$h(l)$	Verteilung Kluftspurlängen aus Window Mapping
$h_B$	Blockhöhe
$h_b$	Höhe des rechteckigen Beprobungsfensters
$h_{max}$	Höhe einer Kluftfläche (Polygon)
$H_R$	Höhe rechteckiger Trennfläche
$h_r$	Hilfslinie Residualberechnung
$i/I$	Rauigkeitswinkel
$j$	durchschnittliche Distanz zwischen Eckpunkten
$JCS$	Joint Wall Compressive Strength
$JRC$	Joint Roughness Coefficient
$k$	Permeabilität
$K$	Komplianztensor
$k_a$	angenäherter Konzentrationsparameter
$k_c$	Anzahl Clusterzentren
$k_e$	Achsenverhältnis Ellipse
$k_f$	Kluftpermeabilität
$k_i$	Ausgangsporeabilität
$k_k$	Kompressionsmodul
$k_m$	Matrixpermeabilität
$K_n$	Einfluss des Kompressionsmodul auf Normalkomplianz
$K_n$	Normalsteifigkeit Kluft
$K_s$	Schersteifigkeit Kluft
$l$	Länge einer Kluft ( $l_{max}$ oder $h_{max}$ )
$L$	Abstand Klüfte in einer Zelle
$l_B$	Blocklänge
$l_{max}$	Länge einer Kluftfläche (Polygon)
$L_r$	Schnittpunkt auf Ebene*
$M$	Ellipsenfaktor
$M_f$	Effekt auf Fluidviskosität
$MS$	Magnitude Scherkraft
$N$	Gesamtzahl Messungen
$n(n_x, n_y, n_z)$	Normalvektorkomponenten

---

$\vec{n}$	Normalvektor
$\widehat{N}_0$	Trennflächen einer Stichprobe, deren beiden Enden im Beprobungsfenster nicht einsehbar sind.
$\widehat{N}_1$	Trennflächen einer Stichprobe, die ein sichtbares und ein zensiertes Ende im Beprobungsfenster aufweisen.
$\widehat{N}_2$	Trennflächen einer Stichprobe, die komplett sichtbar sind innerhalb des Beprobungsfensters.
$\widehat{N}_T$	Die Summe aller Trennflächen einer Stichprobe $\widehat{N}_0 + \widehat{N}_1 + \widehat{N}_2$
$N_0$	Trennflächen, deren beiden Enden im Beprobungsfenster nicht einsehbar sind.
$N_1$	Trennflächen, die ein sichtbares und ein zensiertes Ende im Beprobungsfenster aufweisen.
$N_2$	Trennflächen, die komplett sichtbar sind innerhalb des Beprobungsfensters.
$N_{nw}$	Anzahl Wichtungsfaktoren
$N_S$	Anzahl Schnittpunkte mit Scanline
$N_T$	Die Summe aller Trennflächen $N_0 + N_1 + N_2$
$N_w$	Summe aller Wichtungsfaktoren
$\vec{O}$	Ortsvektor der Geraden
$P$	Druck
$\Delta p$	Druckgradient
$\vec{P}$	Unbekannter Punkt in einer Ebene
$P_r$	Vergleichspunkt
$P_{10}$	Anzahl Trennflächen pro Einheitslänge
$P_{20}$	Anzahl Trennflächen pro Einheitsfläche
$P_{21}$	Länge Trennflächen pro Einheitsfläche
$P_{30}$	Anzahl Trennflächen pro Einheitsvolumen
$P_{32}$	Fläche Trennflächen pro Gesteinsvolumen
$P_{dA}$	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des Auffindens einer Richtung innerhalb einer Winkelfläche $dA$ für jede Einheitswinkelfläche
$PW$	Punkt in Punktwolke
$Q$	Durchflussrate
$\vec{q}$	Richtungsvektor Ellipse
$\vec{R}$	Länge Vektor R
$r_k, r$	Radius Kreis
$r_S$	Radius Beprobungskreis
$r_r$	Residual Fläche zu Punkt
$r_x, r_y, r_z$	Richtungskomponenten eines Normalvektors
$S$	Speicherkoeffizient
$\Delta s$	mittlere Distanz
$\vec{S}$	Schnittpunkt Gerade und Ebene
$s$	Elastischer Komplianztensor
$s_B$	Blockmächtigkeit
$S_f$	Speicherkoeffizient Kluft
$SF$	Sicherheitsfaktor
$T$	Transmissivität
$t_L$	Zeitmessung Laserscanner
$T_z$	Kritische Zugspannung
$\Delta u_n$	Relativer Versatz unter Normalspannung
$\Delta u_s$	Relativer Versatz unter Scherspannung
$V$	Volumen Gestein

---

$\vec{v}$	Hilfsvektor
$v_j$	theoretisches Clusterzentrum
$V_B$	Blockvolumen
$V_B$	Blockvolumen
$v_n(x_n, y_n, z_n)$	Vektor des Eckpunktes einer Fläche
$V_p$	Kompressionswellengeschwindigkeit
$V_s$	Scherwellengeschwindigkeit
$w$	Wichtungsfaktor
$w_B$	Blockbreite
$w_b$	Breite des rechteckigen Beprobungsfensters
$WG$	Würfelgröße des Plane-Patch-Filters
$w_{ni}$	normalisierter Wichtungsfaktor
$X_i$	Datenpunkt an Stelle i bei Clusteranalyse
$x_{min}$	Unterer Schwellenwert bei Wahrscheinlichkeitsberechnung
$\vec{y}$	Parameter der Geraden
$z_i$	Residual an Ort i
$Z_2$	Quadratwurzel der Residuen
$\alpha$	Einfallsrichtung
$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$	Einfallsrichtung in Oktant 1-4
$\alpha_k$	Streuwinkel der Normalvektoren um Clusterzentrum
$\alpha_s$	„Shape“-Faktor
$\beta$	Einfallswinkel
$\beta_e$	Winkel zwischen Hauptachse der Trennfläche und der Orientierung der Kluftspur
$\beta_s$	Kolinearitätsfaktor
$\beta_w, \alpha_w, \lambda_w, \mu_w, \sigma_w$	Komponenten der Wahrscheinlichkeitsberechnung
$\gamma_e$	Winkel Hauptachsenorientierung einer Ellipse
$\Delta$	Sigmafaktor
$\varepsilon$	der Winkel zwischen der Orientierung der Scanline und der Orientierung der Trennflächen
$\varepsilon_{kl}$	Verformung
$\theta$	Winkel Hauptspannung zur Bruchfläche
$\vartheta$	Poissonverhältnis
$\kappa$	Konzentrationsparameter (auch Fisher- Konstante)
$\lambda$	Interporositätsflusskoeffizient
$\zeta$	Dilatationswinkel
$\rho$	Winkel zwischen den Richtungsvektoren R und O
$\rho_f$	Dichte Fluid
$\rho_w$	Dichte Wasser
$\sigma(h)_l$	Standardabweichung der Kluftspurlängen aus Window Mapping
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Normalspannungsrichtungen
$\sigma_a$	Standardabweichung der Hauptachsenlänge einer Ellipse
$\sigma_d$	Differentialspannung
$\sigma_D,$	Standardabweichung der abgeschätzten Kreisdurchmesser
$\sigma_g$	Standardabweichung der gemessenen Kluftspurlängen

---

## Symbolverzeichnis

---

$\sigma_{ij}$	Druck
$\sigma_l$	Standardabweichung Kluftlänge
$\sigma_m$	Mittlere Spannung
$\sigma_n$	Normalspannung
$\sigma_s$	Scherspannung
$\tau$	Scherfestigkeit
$\phi$	Reibungswinkel
$\phi_b$	Winkel zwischen der Vertikalen und der Orientierung der zu untersuchenden Trennflächen in einem Beprobungsfenster
$\varphi_e$	Winkel der Ellipsenorientierung
$\varphi_f$	Kluftporosität
$\Omega$	Winkel Einheitskugel
$\omega, S$	Speicherkoeffizienten
$\omega_a$	Angulare Frequenz

## VI. Abkürzungsverzeichnis

DFN	Discrete Fracture Network
EPM	Equivalent Porous Medium
ISIS	Interactive Set Identification System
KS	Kolmogorow-Smirnow
MDS	Multi-Dimensional-Spacing
NFR	Natural Fractured Reservoir
TLS	Terrestrisches Laserscanning

## VII. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1 Schematische Darstellung eines Kluftnetzwerks bestehend aus 2 Scharen und 2 Anschnitten einer Aufschlusswand. Je nach Anschnittwinkel der sichtbaren Aufschlussfläche relativ zum Kluftnetzwerk variieren die messbaren Abstände, Intensitäten und Größen der Klüfte (aus Burg ). Links sind die Kluftabstände scheinbar geringer und weniger regelmäßig als an der rechten Aufschlusswand. ....	2
Abbildung 2.1 Schaubild verschiedener Trennflächen- bzw. Kluftparameter an einer Aufschlusswand (verändert nach Hudson und Harrison 1997 und González de Vallejo, Luis I. und Ferrer 2011)... 3	3
Abbildung 2.2 Schematische Darstellung einer Trennflächenschar (rot), die mithilfe einer Scanline (schwarz) vermessen wird. Aufgrund einer Orientierungsverzerrung bedingt durch die Orientierung der Scanline relativ zur Trennflächenorientierung und der Orientierung der Aufschlusswand ist eine Wichtung der Ergebnisse als Ausgleich notwendig. Der Wichtungsfaktor ermittelt sich aus dem Kosinus des Winkels zwischen Scanline und Raumlage der Trennflächen. 6	6
Abbildung 2.3 Kreisförmige Verteilung der Orientierungswerte (sphärische Normalverteilung) um einen Mittelpunkt. Die Verteilung ist ein guter Hinweis auf eine Fisher-Form. Dargestellt sind hier die Werte der Kluftschar NW-SE des Römersteinbruchs. ....	7
Abbildung 2.4 Schematische Darstellung eines runden Beprobungsfensters (roter Kreis) im Zuge des "Circular Window sampling" (verändert nach Zhang und Einstein 1998) auf einer geklüfteten Felswand. Durch das Beprobungsfenster können $N_0$ , $N_1$ und $N_2$ bestimmt werden, also Trennflächen die komplett bzw. einseitig zensiert oder deren beiden Enden sichtbar im Fenster sind. ....	11
Abbildung 2.5 Schematische Darstellung eines rechteckigen Beprobungsfensters (schwarzes Rechteck) der Größe $w$ (Breite $w_b$ ) mal $h$ (Höhe $h_b$ ) auf einer geklüfteten Felswand (verändert nach Pahl 1981). Durch das Beprobungsfenster können $N_0$ , $N_1$ und $N_2$ bestimmt werden, das sind Parameter der Trennflächen, die komplett bzw. einseitig zensiert oder deren beiden Enden sichtbar im Fenster sind. Eine wichtige Voraussetzung dieser Methode ist die gleiche Orientierung der Kluftspuren im Gestein bei der Beprobung. ....	12
Abbildung 2.6 Schematische Darstellung der Beziehung zwischen sichtbaren Kluftspurlängen $l$ und zugrundeliegender ellipsenförmiger Kluft (verändert nach Zhang 2005). Die Form ist definiert über die Hauptachsenlänge $a$ ( $a_e$ ) und dem Achsenverhältnis $k$ ( $k_e$ ). Der Winkel $\beta$ ( $\beta_e$ ) bildet die Neigung der Hauptachse der Ellipse relativ zur Kluftspur ab. ....	14
Abbildung 2.7 Darstellung einer Trennfläche wahlweise als Ellipse, mit Hauptachse $a$ ( $a_e$ ) und Nebenachse $b$ ( $b_e$ ), oder Rechteck mit den Kantenlängen $B$ ( $B_R$ ) und $H$ ( $H_R$ ). Beide Formen weisen den gleichen Flächeninhalt und den Mittelpunkt auf. Die quergestreifte Fläche ist die parallel von Rechteck und Ellipse eingenommene Oberfläche (verändert nach Zhang und Einstein 2010). ....	17
Abbildung 2.8 Terminologie der Gesteinsklassifizierung in Hinblick auf Dichte, Intensität und Porosität von Trennflächen. Ein typischer und oft in Geländekampagnen gewonnener Wert, um die Anzahl von Trennflächen zu bestimmen. ist der Intensitäts- und Dichtewert $P_{10}$ (verändert nach Dershowitz und Herda und Mauldon und Dershowitz 2000). ....	19
Abbildung 2.9 Graphische Darstellung der Aufnahmemethoden im Gelände an einer Aufschlusswand. Links ist die Scanline-Methode (rote, gestrichelte Linie) illustriert. Dort ergeben sich 5 Schnittpunkte, zwischen denen die Abstände gemessen werden und aus denen sich schlussendlich der $P_{10}$ Wert bestimmen lässt. Die Mitte zeigt ein Window Mapping (rote, gestrichelte Umrandung) aus dem über die Anzahl und Länge der Klüfte innerhalb des Fensters $P_{20}$ und $P_{21}$ bestimmt werden können. Rechts ist ein Circular Scanline Sampling dargestellt, bei dem über den Radius einer kreisförmigen Scanline und der Anzahl der Schnittpunkte $P_{21}$ bestimmt wird (nach Mauldon und Dershowitz 2000 und Zhang 2005). ....	21
Abbildung 2.10 „Bezeichnungen zur Beschreibung von Gesteinskörpern“ nach DIN 14689-1 (Deutsches Institut für Normung 2011). ....	22
Abbildung 2.11 „Abmessungen der Gesteinskörper“ nach DIN 14689-1 (Deutsches Institut für Normung 2011). ....	23
Abbildung 2.12: Volumenberechnung über bekannte Trennflächenscharen nach Abrutschen eines Gesteinsblocks (braun) ( verändert nach Jaboyedoff 2008). ....	24

Abbildung 2.13 Darstellung der wirkenden Spannungen auf die Flächen eines Würfels (links) sowie des Spannungsellipsoids mit den 3 relevanten Spannungsrichtungen, das die Magnitude der Spannungen graphisch darstellt (aus Burg 2015).....	25
Abbildung 2.14 Graphische Umsetzung des Coulomb'schen Bruchkriteriums im Mohrdiagramm und in einer 2 dimensional Darstellung wirkend auf einen Gesteinskörper bei der Bildung konjugierter Scherbrüche (oben) (aus Burg 2015).....	27
Abbildung 2.15 Darstellung der Mohr'schen Umhüllenden im Mohr-Diagramm. Erreicht der Spannungskreis die Umhüllende, kommt es zum Bruch. Da dies im Bereich negativer als auch positiver Scherspannungen geschieht, kommt es zur Ausbildung 2er konjugierter Scherbrüche (Berührung der Umhüllenden oben und unten) (aus Burg 2015).....	28
Abbildung 2.16 Erweiterung des Coulomb-Kriteriums durch das Griffith-Kriterium im Bereich negativer Normalspannung (Zugspannung). In diesem Bereich kommt es unter Extension zur Ausbildung von Extensionsbrüchen, im Kompressionsbereich zur Ausbildung von Scherbrüchen (aus Burg 2015).....	29
Abbildung 2.17 Zusammenfassende Darstellung aller Bruchkriterien und der sich ausbildenden Bruchformen. Damit es zum Bruch kommt, muss bei zunehmendem Umgebungsdruck auch die Differentialspannung ansteigen (Radius des Kreises) bis hinein in den Bereich des Von Mises-Kriteriums bei plastischer Verformung. a) Extensionsbrüche, b) Hybride-Scher-Dehnungsbrüche, c) reine Scherungsbrüche, d) semi-duktilen Scherbänder und e) plastische Deformation (aus Fossen 2010).....	30
Abbildung 2.18 Darstellung der 3 zu unterscheidenden Bruchmodi (aus Burg 2015).....	31
Abbildung 2.19 Unterscheidung von Brüchen aus Laborexperimenten. Extensionsklüfte (links und rechts) entstehen bei einer Zugbelastung oder bei niedrigem Umgebungsdruck. Das rechte Beispiel ist eine Mischung aus Extensions- und Scherbrüchen, die man auch als Hybridbrüche bezeichnet. In der Mitte findet sich eine typische Ausbildung konjugierter Scherbrüche (aus Burg 2015).....	32
Abbildung 2.20 Diagramm aus DIN 14689-1 (Deutsches Institut für Normung 2011) zur Klassifizierung und Beschreibung von Rauigkeit der Trennflächenoberflächen. 1) stufige, raue, 2) stufige, glatte, 3) wellige, raue, 4) wellige, glatte, 5) ebene, raue und 6) ebene, glatte Oberflächen.....	33
Abbildung 2.21 "Bezeichnungen zur Beschreibung der Öffnungsweite von Trennflächen" nach DIN 14689-1 (Deutsches Institut für Normung 2011).....	33
Abbildung 2.22 Verschiedene Terminierungen von Trennflächen untereinander. Blinde Trennflächen, deren Ende in der Gesteinsmatrix aufgeht (B), Trennflächen, die sich gegenseitig durchschlagen (C) und diffus aneinander liegende, endende Trennflächen (D) sind wichtige Typen der Terminierung (aus Singhal und Gupta 2010).....	34
Abbildung 2.23 "Bezeichnungen zur Beschreibungen der Durchflussrate von Trennflächen" nach DIN 14689-1 (Deutsches Institut für Normung 2011).....	34
Abbildung 3.1 Abbildung des eingesetzten Riegl VZ400 (links, aus Riegl LMS 2014) mit angeschlossener Kamera und GPS. Das HMI (Human-Man-Interface) dient der Bedienung des Geräts, das den Laser an seiner Frontseite über rotierende Spiegel entlang der Oberfläche gleichmäßig verteilt (Bild rechts: Laux 2013).....	37
Abbildung 4.1 Geologische Karte des Oberrheingrabens. Die untersuchten Aufschlüsse befinden sich sowohl westlich als auch östlich des Oberrheingrabens und sind in die Trias (Buntsandstein und Muschelkalk) eingeordnet (Karte nach Dr. Christian Röhr 2006).....	44
Abbildung 4.2 Topographische Übersichtskarte des Römersteinbruchs (rote Markierung) und zugehöriges Satellitenbild ( <i>Topographische Karte</i> : Kartendaten ©OpenStreetMap-Mitwirkende, SRTM  Kartendarstellung ©OpenTopoMap (CC-BY-SA), <i>Satellitenbild</i> : ©2016 Google, ©2009 GeoBasis-DE/BKG, Aufnahmedatum 19.4.2015).....	45
Abbildung 4.3 Fotoaufnahme des Römersteinbruchs (Aufnahme Dennis Laux, 2012).....	46
Abbildung 4.4 Bereinigte Punktwolke des Römersteinbruchs. Vier verschiedene Aufstellpositionen sind für die Erstellung des Modells notwendig.....	46
Abbildung 4.5 Farbige Darstellung der 4 aufgenommenen Punktwolken von 4 Scanpositionen aus. Die farbigen Punktwolken zeigen, wie Bereiche im Steinbruch von unterschiedlichen Positionen aus	

abgedeckt werden und wo große Überlappungen bestehen (Position 1=grün, Position 2=pink, Position 3=türkis und Position 4=gelb).....	47
Abbildung 4.6 Topographische Übersichtskarte des Steinbruchs Rockenau (rote Markierung) und zugehöriges Satellitenbild ( <i>Topographische Karte</i> : Kartendaten ©OpenStreetMap-Mitwirkende, SRTM  Kartendarstellung ©OpenTopoMap (CC-BY-SA), <i>Satellitenbild</i> : ©2016 Google, ©2009 GeoBasis-DE/BKG, Aufnahmedatum 24.4.2015).....	48
Abbildung 4.7 Fotoaufnahme des Steinbruchs bei Eberbach-Rockenau (Aufnahme mit auf Riegel VZ400 montierter NikonD700 am 30.09.2013).....	49
Abbildung 4.8 Bereinigte Punktwolke des Steinbruchs Rockenau.....	49
Abbildung 4.9 Topographische Übersichtskarte des Steinbruchs Eberstadt (rote Markierung) und zugehöriges Satellitenbild ( <i>Topographische Karte</i> : Kartendaten ©OpenStreetMap-Mitwirkende, SRTM  Kartendarstellung ©OpenTopoMap (CC-BY-SA), <i>Satellitenbild</i> : ©2016 Google, ©2009 GeoBasis-DE/BKG, Aufnahmedatum 24.4.2015).....	51
Abbildung 4.10 Gesteinszylinder innerhalb des Steinbruchs Eberstadt, der als Zielobjekt für die Laserscankampagne ausgewählt wird (Foto: Dennis Laux, 2012).....	52
Abbildung 4.11 Punktwolkenmodell des Steinbruchs mit dem zylindrischen Zielobjekt in der Mitte. Es handelt sich hierbei um die Zusammensetzung aus allen 7 Scans, die noch keiner Bereinigung unterzogen sind.....	52
Abbildung 4.12 Dreidimensionale Darstellung der bereinigten Punktwolke des Steinbruchs Eberstadt. Passend dazu ist die lithologische und stratigraphische Abfolge rechts dargestellt. Zudem ist eine deutlich erkennbare Abschiebung gekennzeichnet (rot). Der Untere Muschelkalk besteht aus welligen Kalken (Wellenkalk ist zweimal durch eine oolithische Formation durchzogen (Schaumkalkbank)). Der Mittlere Muschelkalk im Hangenden ist durch dolomitische Kalksteine und Mergel charakterisiert (Hagdorn und Simon 2005).....	53
Abbildung 4.13 Stratigraphische Einordnung der 3 Aufschlüsse (rote Markierung). (Verändert nach Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau 2010, Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland Pfalz, Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland Pfalz).....	57
Abbildung 5.1 Darstellung der einzelnen Komponenten des Normalvektors $n$ und der daraus resultierenden Einfallrichtung $\alpha$ und des Einfallswinkels $\beta$ auf einer Trennfläche (nach Zhang 2005).....	59
Abbildung 5.2 Einteilung des 3D Raumes in seine 8 Oktanten (oben links) für die unterschiedliche Bedingungen bei der Orientierungsberechnung aus Normalvektoren gelten. Die unterschiedlichen Voraussetzungen der oberen 4 Oktanten sind (rechts) detailliert dargestellt.....	60
Abbildung 5.3 Orientierung des Normalvektors (rechts) einer Fläche und Definition des Einfallswinkels $\beta$ und der Einfallrichtung $\alpha$ (links). Jede Fläche ist eindeutig durch 2 Normalvektoren definiert (durchgezogener und gestrichelter Pfeil). Hierbei gilt es die Einfallrichtung (durchgezogen) von der Kipprichtung (gestrichelt) zu trennen.....	61
Abbildung 5.4 Skizzierte Arbeitsweise des „Plane Patch Filters“ für die automatische Orientierungsauswertung. Suchwürfel konstanter Größe werden über die Punktwolke (schwarze Punkte) gleichmäßig verteilt. Innerhalb jedes Würfels wird eine möglichst passende Fläche an die Punkte angepasst (gelbe Flächen), immer unter Einbehaltung der beiden Parameter des maximalen Flächenfehlers und der Mindestanzahl der Punkte. Bei Nichterfüllung aller Parameter wird keine Fläche erzeugt. Am Mittelpunkt jeder Fläche wird ein Punkt mit zugehörigem Normalvektor (rot) erzeugt und kann als Wert in eine ASCII-Datei exportiert werden.....	63
Abbildung 5.5 Detailansicht der Aufschlusswand im Römersteinbruch. (a) Die zur Orientierungsauswertung bereinigte und kolorierte Punktwolke. (b) Berechnung der Normalvektoren (weiß) mit zugehörigen Mittelpunkten (pink) über den „plane patch filter“ bei einer konstanten Würfelgröße von 256 mm. (c) Alle Normalvektoren sind eindeutig 2 Kluftscharen zugeordnet und zur visuellen Unterscheidung und Prüfung in das Modell eingefärbt.....	64
Abbildung 5.6 Schräge Ansicht der Punktwolke des Römersteinbruchs. (a) Die bereinigte Punktwolke dient als Ausgangsdatensatz. (b) Nach der punkweisen Orientierungsauswertung werden alle Punkte nach dem HSV-Farbschema eingefärbt. (c) Eine Kluftchar wird über ihre Orientierungswerte selektiert (100-120° Einfallrichtung und 80-90° Einfallswinkel) und die Selektion rot eingefärbt. Die Lokalisierung und Identifizierung bestimmter Kluftscharen im	



Aufschluss bzw. Modell wird so erleichtert. (d) Die Selektion kann aus der Punktwolke komplett extrahiert und einzeln weiter untersucht werden.....	65
Abbildung 5.7 (a) Vergleich der Ergebnisse sechs unterschiedlicher Würfelgrößen zwischen 4,096 m und 0,128 m bei der Auswertung der Orientierung. Die Ergebnisse sind als Polpunkte in Dichteplots (untere Hemisphäre) und als Kluftrosen dargestellt. Der maximale Flächenfehler und die Mindestanzahl an Punkten sind hierbei konstant. (b) Darstellung zweier Methoden zur Orientierungsauswertung als Vergleich zur Methode unter (a). Links eine Methode, die die Normalvektoren detektierter Flächen innerhalb einer Triangulation betrachtet (über die Software SplitFX) und rechts die Auswertung der Orientierung aller Dreiecke der Triangulation. Die erstgenannte Methode liefert 3288 Orientierungswerte, vernachlässigt aber eine Einbeziehung der Flächengröße. Die zweite Methode liefert mehr als 500000 Werte, die zwar eine Flächenwichtung beinhalten, aber das weitere Bearbeiten der Daten erschweren. Die berechneten Cluster-Zentren beider Methoden stimmen jedoch gut überein. ....	67
Abbildung 5.8 Visualisierung der erzeugten Normalvektoren in der Punktwolke für 3 unterschiedlich gewählte Parameter des maximalen Flächenfehlers, der die Standardabweichung der Normalendistanzen in Metern angibt. Deutliche Variationen in Anzahl und Verteilung der Normalvektoren sind für die 3 Fälle zu beobachten.....	69
Abbildung 5.9 Vergleichende Abbildungen der Normalvektoren unter variierenden Parametern bei der Orientierungsauswertung. (a) Verhältnis der erzeugten Normalvektoren und des maximalen Flächenfehlers für 3 Parameter der Mindestanzahl an Punkten. (b) Anzahl der erzeugten Normalvektoren unter variierender Würfelgröße und ebenfalls 3 verschiedener Werte der Mindestanzahl an Punkten. ....	70
Abbildung 5.10 Vergleich der resultierenden Normalvektoren aus der Orientierungsanalyse bei Anwendung variabler Größen des maximal tolerierten Flächenfehlers (0,01 m, 0,05 m, 0,1 m). Sowohl das Balkendiagramm als auch die Polpunktdarstellungen verdeutlichen eine Zunahme in der Streuung bzw. eine Erhöhung des Rauschens der Orientierung mit zunehmender Toleranz des Flächenfehlers. Die grundlegenden Orientierungen bleiben dabei jedoch unberührt. ....	72
Abbildung 5.11 Auswertung der Orientierungen der Ausgangspunktwolke (a) durch Anwendung eines RANSAC Algorithmus zur Identifizierung der vorhandenen Flächen. Die Ergebnisse (b) zeigen, dass viele Bereiche des Steinbruchs erfolgreich durch konstruierte Flächen abgedeckt sind und der Algorithmus erfolgreich war. ....	74
Abbildung 5.12 Darstellung der Ergebnisse nach Anwendung des RANSAC Algorithmus. In der kombinierten Darstellung der Polpunkte und der Polpunktdichte (links) sind deutlich 3 Trennflächenscharen zu erkennen, eine nahezu horizontale Schichtung und 2 nach NE-SW und NW-SE einfallenden Kluftscharen. Insgesamt sind 289 Orientierungen identifiziert. Die Streuung der beiden Kluftscharen ist teilweise deutlich erkennbar und wird auch in der Kluftrose (rechts) noch einmal deutlich. ....	74
Abbildung 5.13 Beispieelpunktwolke einer Steinbruchwand visualisiert in SplitFX. Bild 1 zeigt die ursprüngliche Punktwolke (Visualisierung der Amplitudenwerte in Graustufen). Nach Triangulation der Punktwolke werden Flächen als Patches/Polygone identifiziert (Bild 2). Die Polygone sind durch die grünen Randmarkierungen in Bild 2 dargestellt. Die aus der Berechnung stammenden Parameter $l_{\max}$ und $h_{\max}$ auf Grundlage der Eckpunkte der Polygone sind als Linien (türkis) gekennzeichnet. ....	79
Abbildung 5.14 Boxplot der nach SW einfallenden Kluftchar (NE-SW) des Steinbruchs Rockenau. Die durchschnittliche Länge bzw. Höhe, da die vertikale Ausdehnung der Kluft $h_{\max}$ gemessen wird, beträgt 1,15 m. Wenige Ausreißer liegen oberhalb der 3 m Marke und erreichen ein Maximum von 4m. Die meisten Kluftlängen schwanken zwischen 0,6 und 1,5 m. ....	82
Abbildung 5.15 Statistik der Kluftlängen bzw. Höhen $h_{\max}$ der Kluftchar NE-SW. Unter a) ist das Histogramm der Werte von $h_{\max}$ und unter b) die empirische Verteilungsfunktion abgebildet. Beide belegen, dass ein Großteil der Werte im Bereich zwischen 0,5 und 1,5 m (a) bzw. 0,3 und 1,3 m (b) liegen. Dies verdeutlicht die hohe Steigung der empirischen Verteilungsfunktion in diesem Bereich. Die Abbildungen c) bis f) dienen einer ersten, visuellen Abschätzung der möglichen, zugrundeliegenden Dichtefunktion der Werte. So lässt Abbildung c) auf einen linearen, d) auf einen exponentiellen, e) auf einen logarithmischen und f) auf einem dem Potenzgesetz unterworfenen Zusammenhang schließen. ....	84

- Abbildung 5.16 Ergebnisse des Kolmogorow-Smirnow Tests der Längendaten  $h_{\max}$  der Kluftschar NE-SW. Aufgezeigt ist die Verteilung der gemessenen Daten (schwarz). Auf Grundlage dieser Verteilung wurden Parameter verschiedener möglicher Dichtefunktionen bestimmt und zufällig Datensätze erstellt, die der jeweiligen Dichtefunktion folgen. Diese sind farbig in die Diagramme eingetragen. Sowohl bei der Exponentialverteilung (orange) als auch bei der Logarithmischen Normalverteilung (blau) ist eine zusätzliche Kurve eingezeichnet, die einen berechneten minimalen Schwellenwert  $x_{\min}$  berücksichtigt, um die Funktion besser den Originaldaten zuzuordnen. Die Exponential-, Gamma-, Poisson- und Weibullverteilung zeigen keine Übereinstimmung mit der originalen Verteilung der Daten. Die Anzahl der erfolgreichen KS-Tests (2500 Durchläufe) liegt bei 0 oder maximal 197 für die Exponentialverteilung. Ausschließlich die Logarithmische-Normalverteilung und das Potenzgesetz weisen eine hohe Anzahl erfolgreicher Tests auf. .... 85
- Abbildung 5.17 Boxplot der nach SW einfallenden Kluftschar (NE-SW) des Steinbruchs Rockenau. Die durchschnittliche Länge ( $l_{\max}$ ) beträgt 1,97 m. Wenige Ausreißer liegen oberhalb der 4 m Marke und erreichen ein Maximum von 6,5 m. Die meisten Kluftlängen schwanken zwischen 1,5 und 2,3 m. .... 86
- Abbildung 5.18 Statistik der Kluftlängen  $l_{\max}$  der Kluftschar NE-SW. Unter a) ist das Histogramm der Werte von  $l_{\max}$  und unter b) die empirische Verteilungsfunktion abgebildet. Beide belegen, dass ein Großteil der Werte im Bereich zwischen 1 und 3 m liegen. Dies verdeutlicht die hohe Steigung der empirischen Verteilungsfunktion in diesem Bereich. Die Abbildungen c) bis f) dienen einer ersten, visuellen Abschätzung der möglichen, zugrundeliegenden Dichtefunktion der Werte. Sowohl ein exponentieller Trend (d, Bestimmtheitsmaß  $R^2=0,97$ ) oder ein logarithmischer (e,  $R^2=0,9$ ) scheinen möglich. .... 87
- Abbildung 5.19 Ergebnisse des Kolmogorow-Smirnow Tests der Längendaten  $l_{\max}$  der Kluftschar NE-SW. Aufgezeigt ist die Verteilung der gemessenen Daten (schwarz). Die Exponential-, Gamma- und Poissonverteilung zeigen keine Übereinstimmung mit der originalen Verteilung der Daten. Die Anzahl der erfolgreichen KS-Tests (2500 Durchläufe) liegt bei 0. Ausschließlich die Logarithmische-Normalverteilung und das Potenzgesetz weisen eine hohe Anzahl erfolgreicher Tests auf (<2400). Die logarithmische Verteilung ohne Schwellenwert  $x_{\min}$  ist die hier favorisierte Dichtefunktion (blau). .... 89
- Abbildung 5.20 Darstellung der beiden Kluftlängenparameter  $h_{\max}$  (schwarz) und  $l_{\max}$  (rot) als empirische Verteilungsfunktionen. Die Verteilung der Längen ist ähnlich, jedoch liegen die Werte von  $h_{\max}$  konstant unter denen von  $l_{\max}$ . Im Mittel unterscheiden sie sich um 0,8 Meter. .... 91
- Abbildung 5.21 Vergleichende Boxplots der Höhen  $h_{\max}$  und der maximalen Ausdehnung oder Länge  $l_{\max}$ . Die Werte der Länge liegen konstant über denen der Höhe. .... 91
- Abbildung 5.22 Boxplot der nach SW einfallenden Kluftschar (NE-SW) des Steinbruchs Rockenau. Die durchschnittliche Flächengröße  $A$  beträgt 0,68 m. Wenige Ausreißer liegen oberhalb der 4 m Marke und erreichen ein Maximum von 7,5 m. Die meisten Flächeninhalte schwanken zwischen 0,3 und 0,8 m. .... 92
- Abbildung 5.23 Vergleich der Verteilungsfunktion der Fläche (schwarz), der daraus berechneten Diagonallängen für unterschiedliche, angenommene Geometrien (blau, gelb, grün) und der ursprünglich berechneten Länge  $l_{\max}$  (rot). .... 93
- Abbildung 5.24 Veranschaulichung der Arbeitsschritte zum Transfer der durch einen RANSAC-Algorithmus identifizierten Flächen in Fracman zur weiteren Bearbeitung. In diesem Fall werden Kluftflächen mit sogenannten „Tracemaps“ verschnitten, um Kluftspuren zu erstellen. Diese werden für eine Quantifizierung der Kluftspurlängen benötigt. A: Ausgangspunktwolke (in CloudCompare), visualisiert in RGB Farben. B: Durch den RANSAC Algorithmus identifizierte Flächen in der Punktwolke. C+D: Importierte Flächen aus B in Fracman. Die Flächen wurden nach ihrer Orientierung in Scharen aufgeteilt und entsprechend koloriert (blau = WNW-ESE, rot = NE-SW, grün = NW-SE). Die Punktwolke wurde in C als Mesh (bzw. DEM) in Fracman hinzugefügt. E: Erstellung der 3 Tracemaps entlang der Aufschlusswände (dunkelgrau: Nordflanke, grau: Westflanke, grau-grün: Südflanke). F: Tracemaps mit Kluftspuren aus der Verschneidung mit den 3 Kluftscharen. .... 96

Abbildung 5.25 Kumulative Dichtefunktion der Kluftspurlängen der NE-SW einfallenden Kluftschar des Steinbruchs Rockenau. Als Kluftspurlängen aufgetragen sind hier die Längen aller auf der Verschneidungsfläche (Tracemap) auftretenden Kluftspuren.....	98
Abbildung 5.26 Kumulative Dichtefunktion der Kluftspurlängen der NE-SW (CMW) einfallenden Kluftschar des Steinbruchs Rockenau. Als Kluftspurlängen aufgetragen sind hier die Längen aller auf der Verschneidungsfläche (Tracemap) auftretenden Kluftspuren (blaue Kurve) und die Kurve der simulierten Kluftlängen, die auf Grundlage der Dichtefunktion erstellt wurden, die durch das Circular Window Mapping bestimmt sind. ....	100
Abbildung 5.27 Diagramm der in Abhängigkeit des Winkels $\beta_e$ und des Achsenverhältnisses $k_e$ ermittelten Werte für $\mu_a$ und $\sigma_a$ der Kluftschar NE-SW im Aufschluss Rockenau. Für jede beprobte Aufschlusswand im Steinbruch (West- (blau), Nord- (rot) und Südflanke (grün)) werden die Resultate ermittelt. Die nicht berücksichtigten Resultate aus zu wenig erfassten Kluftflächen (Anzahl <10) wurden bereits herausgefiltert. Der Wert des Winkels $\beta$ wurde solange angepasst bis sich die 2 Linien der mittleren Kluftspurlängen $\mu_a$ und der Standardabweichung der Kluftspurlängen $\sigma_a$ in jeweils einem Punkt schneiden, so dass sie das gleiche Achsenverhältnis $k$ aufweisen. Bei einem Achsenverhältnis $k_e$ von 4 ergibt sich $\mu_a$ zu 2,4 m und $\sigma_a$ zu 2,4 m.....	102
Abbildung 5.28 Diagramm der in Abhängigkeit des Winkels $\beta_e$ und des Achsenverhältnisses $k_e$ ermittelten Werte für $\mu_a$ und $\sigma_a$ der Kluftschar WNW-ESE im Aufschluss Rockenau. Für jede beprobte Aufschlusswand im Steinbruch (West- (blau), Nord- (rot) und Südflanke (grün)) werden die Resultate ermittelt. Der Wert des Winkels $\beta_e$ wurde solange angepasst bis sich die 3 Linien der mittleren Kluftspurlängen $\mu_a$ und der Standardabweichung der Kluftspurlängen $\sigma_a$ in jeweils einem Punkt schneiden, so dass sie das gleiche Achsenverhältnis $k$ aufweisen. Bei einem Achsenverhältnis $k_e$ von 4,2 ergibt sich $\mu_a$ zu 2,5 m und $\sigma_a$ zu 2,5 m. ....	103
Abbildung 5.29 Diagramm der in Abhängigkeit des Winkels $\beta_e$ und des Achsenverhältnisses $k_e$ ermittelten Werte für $\mu_a$ und $\sigma_a$ der Kluftschar NW-SE im Aufschluss Rockenau. Für jede beprobte Aufschlusswand im Steinbruch (West- (blau), Nord- (rot) und Südflanke (grün)) werden die Resultate ermittelt. Die nicht berücksichtigten Resultate aus zu wenig erfassten Kluftflächen (Anzahl <10) wurden bereits herausgefiltert. Der Wert des Winkels $\beta_e$ wurde solange angepasst bis sich die 3 Linien der mittleren Kluftspurlängen $\mu_a$ und der Standardabweichung der Kluftspurlängen $\sigma_a$ in jeweils einem Punkt schneiden, so dass sie das gleiche Achsenverhältnis $k$ aufweisen. Bei einem Achsenverhältnis $k_e$ von 2,3 ergibt sich $\mu_a$ zu 2,9 m und $\sigma_a$ zu 2,9 m.....	103
Abbildung 5.30 Triangulierte Punktwolke des Beispielaufschlusses Rockenau (in SplitFX). Die grün umrandeten Markierungen zeigen die identifizierten Kluftflächen.....	109
Abbildung 5.31 Erstellte DFN Modelle der NE-SW Schar des Steinbruchs Rockenau. Erkannte Kluftflächen sind in das Modell als rote Rechtecke integriert. Zusätzlich werden je 60 stochastische Kluftflächen auf Grundlage der durchgeführten Größenberechnungen als Rechtecke oder Ellipsen simuliert. a) Nutzung des Parameters $l_{max}$ aus Methode 1 zur Erstellung von Rechteckflächen. b) Eingabeparameter ist hier ein Radius, der aus den berechneten Ellipsengrößen quantifiziert wurde, Neigung $\gamma$ und Achsenverhältnis $k$ wurden aus den zugehörigen Berechnungen übernommen. c) Ellipsen mit Radius $\mu_i$ . d) Ellipsen mit Radius $\mu_a$ . e) Radius wie in d, aber horizontale Ausrichtung. f) Horizontale Rechtecke aus $\mu_i$ . ....	111
Abbildung 5.32 Die berechneten kumulativen Verteilungen der Flächengrößen aus den Kluftflächen verschiedener, untersuchter DFN Modell sind in diesem Diagramm farblich aufgetragen. ....	112
Abbildung 5.33 Illustration der Scanline von den gewählten Punkten A zu B durch die Ebenen 1-4. Nach Berechnung der Schnittpunkte $S_1 - S_4$ , wird eine geometrische Form auf der Ebene konstruiert, die der in der Punktwolke identifizierten Kluftfläche entspricht und den gleichen Mittelpunkt hat. In diesem Beispiel sind Ellipsen konstruiert. Die Schnittpunkte $S_2$ und $S_3$ liegen außerhalb der Ellipsen, $S_1$ und $S_3$ innerhalb der Ellipsen. Zwischen diesen beiden wird der Kluftabstand bestimmt. Über den Winkel $\phi$ kann der Abstand nach Terzaghi (Terzaghi 1965) korrigiert werden. ....	115
Abbildung 5.34 Grafische Darstellung der erstellten Kreisfläche. Vom Mittelpunkt C wird der Abstand $d$ zum Schnittpunkt S bestimmt (in Richtung des Vektors $d$ ). Ebenso wird der Radius $r$ bestimmt, der der halben Länge der maximalen Flächenausdehnung entspricht. Über einen Vergleich der Längen von $r$ zu $d$ lässt sich feststellen, ob der Schnittpunkt S innerhalb oder außerhalb des Kreises liegt.....	116

Abbildung 5.35 Visualisierung aller 8 Quadranten in einem kartesischen Koordinatensystem im dreidimensionalen Raum. ....	118
Abbildung 5.36 Detaillierte Darstellung der Ellipsenkonstruktion Vom Mittelpunkt C wird der Abstand d zum Schnittpunkt S bestimmt (in Richtung des Vektors d). Ebenso wird der Radius r bestimmt, der der halben Länge der maximalen Flächenausdehnung entspricht. Über einen Vergleich der Längen von r zu d lässt sich feststellen, ob der Schnittpunkt S innerhalb oder außerhalb der Ellipse liegt. Wichtig ist dabei die Berücksichtigung des Winkels $\varphi_e$ und des Vektors q, der die Richtung der Hauptachse a der Ellipse definiert. Auf der Ebene E (braun) werden Ellipsen mit dem Mittelpunkt C konstruiert, deren Ausrichtung über den Vektor q definiert ist und die aufgeschlossene Kluftfläche komplett umschließen. Dieser wird über den Hilfsvektor v berechnet, der ebenfalls auf der Ebene E liegt. ....	119
Abbildung 5.37 Räumliche Darstellung der zu bestimmenden Parameter für die Berechnung des $P_{32}$ Intensitätswerts. Die Vektoren der Scanline O, des Fisher Mean Poles R und der Normalen der Kluft spannen verschiedene Winkel auf, wobei der Winkel $\rho$ zu bestimmen ist. (verändert nach Wang 2005). ....	121
Abbildung 5.38 Darstellung der Funktionen der Koeffizienten a, b und c in Abhängigkeit der Fisher-Konstante $\kappa$ zur Berechnung des Umwandlungsfaktors $C_{13}$ (aus Wang 2005). ....	122
Abbildung 5.39 Darstellung der über einen RANSAC Algorithmus detektierten Flächen im Römersteinbruch. a – die Ausgangspunktwolke. b – detektierte Kluftflächen auf der Punktwolke und – c – ohne Punktwolke im Hintergrund. Insgesamt wurden 184 Flächen identifiziert.....	124
Abbildung 5.40 Durch SplitFX identifizierte Flächen (blau) in der Punktwolke. Insgesamt werden 266 Flächen konstruiert und damit 82 mehr als durch die RANSAC Methode. ....	125
Abbildung 5.41 Links die Ausgangspunktwolke des Römersteinbruchs. Rechts konstruierte Ellipsen im Achsenverhältnis 2:1 für Kluftflächen der NW-SE Schar mit einer gewählten Scanline, die hier 7 Ellipsen schneidet.....	125
Abbildung 5.42 Oben: Vergleich der Abstände der Kluftschar NW-SE aus allen 3 vorgestellten Methoden (Kreise links, Ellipsen rechts), dargestellt in einer empirischen, kumulativen Dichtefunktion. Die Kluftintensität steigt hierbei proportional mit der Steigung der Kurven. Unten links: Vergleich der Abstände der Kluftschar NE-SW aus allen 3 vorgestellten Methoden. Unten rechts: Vergleich der Abstände der Ellipsen und Kreise aus der RANSAC Methode. Die Abstände der Ellipsen steigen steiler an und zeigen somit eine höhere Kluftintensität. ....	128
Abbildung 5.43 Anzahl der Schnittpunkte der konstruierten Ellipsen mit einer um ihren Ursprung rotierenden Scanline (links) und die korrigierten Intensitätswerte (nach Terzaghi) aus der Anzahl der Schnittpunkte (rechts).....	130
Abbildung 5.44 Visualisierung der Kluftintensitäten des Römersteinbruchs. a – Im Römersteinbruch manuell identifizierte Kluftspuren und Kanten. b – Kolorierung der Intensität auf Grundlage der Kluftspuren aus a. Die Ergebnisse sind noch nicht vom sogenannten „Edge-Effekt“ befreit. Eine deutliche Häufung ist innerhalb des Steinbruchs zu erkennen (Mitte links). c – Kolorierung der Intensität auf Grundlage der Mittelpunkte der erkannten Flächen. Ein Grenzradius g von 2,5 m wird hier angewendet. Markant erkennbar sind viele blaue Bereiche, in denen die Intensität nahezu null ist. d – Eine Erhöhung des Grenzradius führt auch zu einer Reduzierung der blauen Bereiche ohne oder mit geringer Intensität. e – Ein hoher Radius g von 10 m führt zu einem sehr harmonischen Bild der Intensität und einige Bereiche mit hoher Intensität stechen heraus. Für die Bilder in c, d und e wird nicht, wie in Bild b, die Einteilung in 18 Farbklassen verwendet, sondern es werden die berechneten Intensitätswerte direkt über die Software koloriert. ....	132
Abbildung 6.1 Klassifizierung von Gesteinsformationen anhand ihres Anteils an Kluft- und Matrixporosität sowie Kluft- und Matrixpermeabilität in Reservoirtypen (verändert nach Nelson 2001; Bratton et al. 2006). ....	135
Abbildung 6.2 Zusammenhang von Apertur, Kluftabstand und Kluftpermeabilität in einem NFR („Natural Fractured Reservoir“). Eine Erhöhung der Apertur und eine Minderung der Kluftabstände führen zu erhöhter Permeabilität (verändert nach Nelson 2001).....	136
Abbildung 6.3 Ein heterogenes Ausgangsgestein aus Matrix, Klüften und Hohlräumen muss für eine Modellierung simplifiziert werden. Dazu bieten sich Dual-Porosity-Modelle (Warren und Root 1963) an oder die Erstellung eines DFN Modells, das die Kluftgeometrie weniger stark vereinfacht darstellt. (verändert nach La Pointe et al. 1997). ....	138

Abbildung 6.4 Übersicht zum allgemeinen Ablauf bei der Erstellung eines DFN Modells. Ausgangsdaten aus verschiedenen Quellen werden zu Eingabedaten aufgearbeitet, um final ein DFN Modell zu erstellen, das die Möglichkeit zur Aufskalierung bietet und verschiedene Parameter als Ergebnisse quantifiziert. ....	140
Abbildung 6.5 Polpunktdarstellung der beiden Teilbereiche B-3 und B-4. (a) Identifizierung von Clusterzentren über einen k-means Algorithmus. (b) Anwendung des ISIS Algorithmus zur Clusterbildung. (c) Dichteplotdarstellungen der beiden Teilbereiche.....	147
Abbildung 6.6 Detaillierte Ansicht des Teilbereichs B4 des Steinbruchs Eberstadt (oben). Gestrichelt umrandet sind dabei die näher untersuchten Teilbereiche und ihre zugehörige Orientierung. Die Auswahl eines Orientierungsbereiches erlaubt eine visuelle Differenzierung auf der Punktwolke (Mitte). Eine Darstellung im HSV-Farbraum kennzeichnet alle Orientierungen farblich und lässt die visuelle Identifizierung von Orientierungen und ihre Verteilung zu (unten). ....	148
Abbildung 6.7 Der Fluidfluss $Q$ zwischen 2 Platten nach dem "parallelen Platten-Modell", bzw. zwischen zwei Kluftwänden. Die Kluft besitzt die Apertur $b$ , die Länge $l$ und die Höhe $H$ (verändert nach Klimczak et al. 2010). ....	151
Abbildung 6.8 Aus der Punktwolke erstelltes digitales Höhenmodell (oben) und das darin erstellte DFN Modell aus den quantifizierten Trennflächenparametern, aufgeteilt in 2 Bereiche (oben türkis/rot, unten blau/rot) für die weitere Berechnung hydraulischer und geomechanischer Kenngrößen. ....	156
Abbildung 6.9 Ausmaße des Steinbruchs Eberstadt dargestellt an der erstellten Punktwolke aus insgesamt 7 Scanpositionen (Bild oben). Die säulenartige Aufschlusstruktur hat einen Durchmesser von ungefähr 75 Metern. Unten ist eine Frontalansicht visualisiert. Die Punktwolke ist in RGB-Farben visualisiert. Die Höhe der Struktur beträgt 25 Meter an der niedrigsten und bis zu 50 Meter an der höchsten Stelle. Die Aufschlusswand ist bereits von Vegetation und umliegenden Geh- und Fahrbereichen bereinigt. ....	157
Abbildung 6.10 Aufteilung der bereinigten Punktwolke des Steinbruchs Eberstadt. Eine große Abschiebung liegt zentral inmitten des Gesteinskörpers (oben). Neben der horizontalen Aufteilung in einen oberen Bereich A und unteren Bereich B erfolgt eine vertikale Einteilung in 6 weitere Teilbereiche (unten).....	158
Abbildung 6.11 Ergebnisse der Clusteranalysen mithilfe eines k-means Algorithmus aus den durch die Punktwolke ermittelten Orientierungsdaten. Links sind alle Clusterzentren der 12 Teilbereiche geplottet und durch die Kreise jeweils 4 Scharen zugeordnet. Schar 1 und 2 stellt die Hauptklüftung, Schar 3 die Schichtung und Schar 4 eine Nebenorientierung dar. Rechts sind die mittleren Orientierungen der einzelnen Clusterzentren markiert, die schlussendlich die durchschnittliche Orientierung der Scharen angibt. ....	160
Abbildung 6.12 Lokale Variationen der Kluftparameter entlang der Aufschlusswand. Im oberen Bild sind die Intensitäten $P_{10}$ der Hauptklüftungen den Teilbereichen zugeordnet. Gerade im Bereich B ist eine hohe Schwankung der Werte zu beobachten, die von Bereich B-1 bis B-4 zunächst zunehmen und danach rapide abnehmen. Die Intensitäten im Bereich A zeigen ein ähnliches Muster, allerdings ist der Schwankungsbereich deutlich geringer. Im unteren Bild ist die Variation der ermittelten Orientierungswerte als Kluftrosen dargestellt. Je nach Winkel der Aufschlusswand relativ zum Kluftnetzwerk ist eine der beiden Hauptklüftungen stärker ausgeprägt. ....	163
Abbildung 6.13 Kumulative Verteilung der Kluftabstände der Scharen 1 und 2 in den Bereichen A (rot) und B (blau). Der zunächst starke Kurvenanstieg illustriert das hohe Maß an kleinen Abständen. Insgesamt liegen die Abstände der Schar 1 unter der von Schar 2 und der Bereich A weist geringere Abstände als Bereich B auf.....	164
Abbildung 6.14 Kumulative Verteilung der Kluftlängen der Scharen 1 und 2 in den Bereichen A (rot) und B (blau). Der zunächst starke Kurvenanstieg illustriert das hohe Maß an kleinen Kluftlängen. Die 4 Kurven verlaufen nahezu identisch. ....	165
Abbildung 6.15 Erstelltes DFN Modell mit einer Größe von $17*17*5$ (oben 9?) m ( $x*y*z$ ). Die für den Steinbruch Eberstadt ermittelten Kluftparameter wurden auch für dieses Modell genutzt. Zwei unterschiedliche Szenarien mit 1 mm und 0,01 mm Apertur werden aus diesem Modell kreiert. Im oberen Bereich sind 2 Kluftscharen äquivalent zu den Scharen A-1 (blau) und A-2 (rot)	

erstellt, im unteren Bereich 2 Scharen äquivalent zu B-1(grün) und B-2 (türkis). Die beiden horizontalen Scharen in dunkelrot und violett stehen für die Schichtung. ....	167
Abbildung 6.16 Vergleich der Unterschiede in der Permeabilität in xx-Richtung ( $k_{xx}$ ) bei der Wahl unterschiedlicher Ausgangspermeabilitäten. Die xx-Richtung wird repräsentativ gewählt und diese Ergebnisse lassen sich gleichwertig auf alle Richtungen übertragen. Die Verteilung der Permeabilität im Raum wird durch die Apertur nicht beeinflusst, sondern nur ihr absoluter Wert. Dieser unterscheidet sich bei einer Erhöhung der Permeabilität um den Faktor 100 (von 0,01 mm auf 1 mm) um das 10000-fache. Links (Fall a) und rechts (Fall b) sind die Permeabilitätswerte verteilt im Raster und aufgeführt im Histogramm zu sehen. Diese Verteilungen sind identisch und schwanken für den Fall a zwischen 0 und 160 md und für Fall b zwischen 0 und $1,6 \cdot 10^6$ md. .	168
Abbildung 6.17 Ergebnisse des Aufskalierungsprozesses nach Oda für das DFN Modell des Steinbruchs Eberstadt. Aus dem ursprünglichen DFN Modell (a) werden unter anderem die Permeabilität $K_{xx}$ (b), $K_{yy}$ (c) und $K_{zz}$ (d) visualisiert. Die rote Fläche stellt die Grenze des lithologischen Wechsels in den oberen und unteren Bereich des Steinbruchs Eberstadt dar. Die Permeabilitäten sind auch einzeln zu betrachten, um Variationen innerhalb dieses Bereichs stärker ausprägen (e unten, f oben). Deutlich zeigen sich die höheren Permeabilitäten im oberen Bereich des Modells. ....	170
Abbildung 6.18 Darstellung der Kluftporosität $P_{33}$ (links) und der Kluftanzahl pro Rasterzelle (rechts) des mit der Oda Methode aus dem DFN Modell des Steinbruchs Eberstadt aufskalierten Rasters. ....	171
Abbildung 6.19 Visualisierung der Ergebnisse der Oda Gold Methode. Dargestellt sind jeweils die Kluftporosität $P_{33}$ (a) und stellvertretend die Permeabilität $K_{xx}$ (b), $K_{yy}$ (c) und $K_{zz}$ (d). Insbesondere $K_{yy}$ ist im unteren Bereich deutlich niedriger als im oberen. ....	172
Abbildung 6.20 Visualisierung der Kluftanzahl pro Zelle des größeren Rasters des Eberstadtmodells. Die Anzahl der Klüfte ist im oberen Bereich deutlich höher. Die geringe Rasterauflösung stellt diesen Unterschied visuell deutlicher dar. ....	174
Abbildung 6.21 Visualisierung der berechneten Permeabilitäten durch das dynamische Aufskalieren. (a) – Das der Berechnung als Grundlage dienende DFN Modell des Steinbruchs Eberstadt. Visualisierung der $K_{xx}$ (b), $K_{yy}$ (c) und $K_{zz}$ (d) Permeabilitäten im Raster. ....	175
Abbildung 6.22 Vergleich der berechneten Permeabilitäten nach Oda und dem dynamischen Aufskalieren (Block K Methode) in 3 Hauptrichtungen. ....	176
Abbildung 6.23 Histogramm der berechneten Elastizitätsmodule („Isotropic Youngs Modulus“) in den Rasterzellen des DFN Modells A. Die Ergebnisse sind normalverteilt. ....	180
Abbildung 6.24 Histogramm der berechneten Elastizitätsmodule („Isotropic Youngs Modulus“) in den Rasterzellen des DFN Modells B. Die Ergebnisse sind normalverteilt. ....	181
Abbildung 6.25 Visualisierung des isotropen E-Moduls [MPa] des Modells A. ....	182
Abbildung 6.26 Visualisierung des isotropen E-Moduls [MPa] des Modells B. ....	182
Abbildung 6.27 Visualisierung der ermittelten Parameter auf Grundlage des DFN Modells Eberstadt. Es handelt sich hierbei um die Ergebnisse des Modells A. Dargestellt ist neben den berechneten Parametern der VTI-Symmetrie auch die isotrope Poissonzahl der isotropen Berechnung (oben links). Auffallend ist die räumlich gleiche Verteilung der Werte für die isotrope Poissonzahl, den Schermodul und den transversalen E-Modul sowie den longitudinalen E-Modul und die XZ-Poissonzahl. ....	184
Abbildung 6.28 Visuelle Darstellung der Stabilitätsanalyse. A – Das verkleinerte DFN Modell innerhalb des ursprünglichen digitalen Höhenmodells des Steinbruchs Eberstadt, beide werden für die Analyse miteinander verschnitten. B – Zuvor wird das Höhenmodell simplifiziert, um die Rechenzeit zu verringern. Entlang der Oberfläche sind die Blöcke dargestellt, grün die stabilen und rot die instabilen Blöcke. C – Ein genauerer Blick auf die erstellten Blöcke, rot markiert sind alle instabilen Blöcke entlang der Aufschlusswand. D – Die Visualisierung des Sicherheitsfaktors erlaubt einen detaillierten Blick auf die Stabilität aller Blöcke. In Rot- und Gelbtönen sind alle instabilen Blöcke ( $SF < 1$ ) markiert, während bedingungslos stabile Blöcke in Dunkelblau dargestellt sind. Dort ist der Sicherheitsfaktor größer als 100. ....	189
Abbildung 6.29 Histogramm der berechneten Sicherheitsfaktoren der Hangstabilitätsberechnung am DFN Modell des Steinbruchs Eberstadt. ....	190

Abbildung 6.30 Visuelle Darstellung der Stabilität der Blöcke um einen hypothetischen Tunnel. A – Konstruktion einer Tunnelröhre durch das Modell des Steinbruchs Eberstadt. B – Der Tunnel schneidet nur den unteren Bereich des DFN Modells, bestehend aus einer Schichtung und 2 Hauptklufttrichtungen; der obere Bereich bleibt unberücksichtigt. C – Darstellung instabiler (rot) und stabiler Blöcke (grün) an der Tunnelröhre. Die instabilen Bereiche liegen stets im oberen Bereich des Tunnels. D – Farbliche Darstellung des Sicherheitsfaktors. In Blau sind die stabilsten Blöcke dargestellt, in Rot wieder die instabilen.....	191
Abbildung 6.31 Histogramm der berechneten Sicherheitsfaktoren der Tunnelstabilitätsberechnung am DFN Modell des Steinbruchs Eberstadt.....	192
Abbildung 6.32 Schematische Darstellung des MDS-Algorithmus. Drei orthogonal zueinander liegende Röhren (rot) werden erstellt und die Abstände in 3 Raumrichtungen quantifiziert ( $S_x$ , $S_y$ , $S_z$ ) (aus Golder Associates 2015).....	195
Abbildung 6.33 Histogramm der berechneten Volumina aus dem MDS-Algorithmus. Kleine Volumina unter $0,01 \text{ m}^3$ überwiegen, nur vereinzelt treten Volumina größer als $0,05 \text{ m}^3$ auf und erreichen einen Maximalwert von $0,45 \text{ m}^3$ .....	195
Abbildung 6.34 Visualisierung der Ergebnisse der Blockgrößenbestimmung. Die Einzelblöcke können farblich unterschieden werden. Die Darstellung der Volumina zeigt deutlich viele kleine Blöcke im oberen Bereich des Modells und wenige große Blöcke in der Mitte. Der Kollinearitätsfaktor $\beta_s$ zeigt viele kubische, aber auch vereinzelt längliche Blöcke, während die Variabilität des Shape-Faktors $\alpha_s$ geringer ist und komplett im kubischen Bereich liegt.....	197
Abbildung 6.35 Das Blockformdiagramm nach {Kalenchuk 2006}. In Blau ist das Ergebnis der Auswertung eingetragen, das die Durchschnittswerte des Shape-Faktors $\alpha$ und des Kollinearitätsfaktors $\beta$ anzeigt. Im Mittel kann die Form der Blöcke als durchweg kubisch (cubic) angenommen werden.....	198
Abbildung 6.36 Histogrammdarstellung der mithilfe des Fragmentierungsrasters berechneten Volumen. Nur wenige Volumen sind größer als $0,1667 \text{ m}^3$ .....	199
Abbildung 8.1 Visualisierung der Rauigkeit durch farbige Darstellung der Residuen (links) auf einer ausgewählten Trennfläche.....	208
Abbildung 8.2 Die Ergebnisse der Orientierungsanalyse auf Flächen unterschiedlicher Größen werden als Polpunkte dargestellt. Ein umschließender Kreis um alle Polpunkte markiert die Ausdehnung des Rauigkeitswinkels I. Dieser kann direkt am Kreis über die Eintragung einer möglichen Rutschungsbewegung (possible slip direction) abgelesen werden.....	209
Abbildung 8.3 Erstellte Profilinien (blau) und Diagrammdarstellung dieser Linie in der Horizontalen zur Berechnung der Residuen.....	210
Abbildung 11.1 Zusammenfassender Boxplot der NW-SE Kluftschar des Steinbruchs Rockenau ( $h_{\max}$ ).....	225
Abbildung 11.2 Statistik des Parameters $h_{\max}$ der Kluftschar NW-SE.....	226
Abbildung 11.3 Ergebnisse des Kolmogorow-Smirnow Tests der Flächendaten der Kluftschar NW-SE ( $h_{\max}$ ).....	227
Abbildung 11.4 Zusammenfassender Boxplot der NW-SE Kluftschar des Steinbruchs Rockenau ( $l_{\max}$ ).....	228
Abbildung 11.5 Statistik des Parameters $l_{\max}$ der Kluftschar NW-SE.....	229
Abbildung 11.6 Ergebnisse des Kolmogorow-Smirnow Tests der Flächendaten der Kluftschar NW-SE ( $l_{\max}$ ).....	230
Abbildung 11.7 Zusammenfassender Boxplot der WNW-ESE Kluftschar des Steinbruchs Rockenau ( $h_{\max}$ ).....	231
Abbildung 11.8 Statistik des Parameters $h_{\max}$ der Kluftschar WNW-ESE.....	232
Abbildung 11.9 Ergebnisse des Kolmogorow-Smirnow Tests der Flächendaten der Kluftschar WNW-ESE ( $h_{\max}$ ).....	233
Abbildung 11.10 Zusammenfassender Boxplot der WNW-ESE Kluftschar des Steinbruchs Rockenau ( $l_{\max}$ ).....	234
Abbildung 11.11 Statistik des Parameters $l_{\max}$ der Kluftschar WNW-ESE.....	235
Abbildung 11.12 Ergebnisse des Kolmogorow-Smirnow Tests der Flächendaten der Kluftschar WNW-ESE ( $l_{\max}$ ).....	236

Abbildung 11.13 Statistik der Flächengrößen der Kluftschar NE-SW. Sie zeigt ähnliche Trends wie die Parameter $h_{\max}$ und $l_{\max}$ .	238
Abbildung 11.14 Ergebnisse des Kolmogorow-Smirnow Tests der Flächendaten der Kluftschar NE-SW. Aufgezeigt ist die Verteilung der gemessenen Daten (schwarz). Die logarithmische Normalverteilung und das ein Potenzgesetz weisen eine hohe Anzahl erfolgreicher Tests auf. Die logarithmische Verteilung ohne Schwellenwert $x_{\min}$ ist die hier favorisierte Dichtefunktion (blau).	239
Abbildung 11.15 Simulierte Kluftlängen (orange) aus der Kluftspuranalyse mit Fracman an allen 3 Flanken des Aufschlusses (NE-SW). Nicht korrigierte Werte („Tracemap“) und korrigierte Werte (CWM = Circular Window Mapping).	240
Abbildung 11.16 Simulierte Kluftlängen (orange) aus der Kluftspuranalyse mit Fracman an allen 3 Flanken des Aufschlusses (NW-SE). Nicht korrigierte Werte („Tracemap“) und korrigierte Werte (CWM = Circular Window Mapping).	241
Abbildung 11.17 Simulierte Kluftlängen (orange) aus der Kluftspuranalyse mit Fracman an allen 3 Flanken des Aufschlusses (WNW-ESE). Nicht korrigierte Werte („Tracemap“) und korrigierte Werte (CWM = Circular Window Mapping).	242
Abbildung 11.18 Histogramm der Abstände im Bereich A (Steinbruch Eberstadt) der Kluftschar 1.	246
Abbildung 11.19 Histogramm der Abstände im Bereich B (Steinbruch Eberstadt) der Kluftschar 1.	246
Abbildung 11.20 Histogramm der Abstände im Bereich A (Steinbruch Eberstadt) der Kluftschar 2.	247
Abbildung 11.21 Histogramm der Abstände im Bereich B (Steinbruch Eberstadt) der Kluftschar 2.	247
Abbildung 11.22 Histogramm der Längen im Bereich A (Steinbruch Eberstadt) der Kluftschar 1....	248
Abbildung 11.23 Histogramm der Längen im Bereich A (Steinbruch Eberstadt) der Kluftschar 2....	248
Abbildung 11.24 Histogramm der Längen im Bereich B (Steinbruch Eberstadt) der Kluftschar 1....	249
Abbildung 11.25 Histogramm der Längen im Bereich B (Steinbruch Eberstadt) der Kluftschar 2....	249



## VIII. Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1 Die Formeln zur Umrechnung der mittleren Kluftspurlänge $\mu_l$ und deren Standardabweichung $\sigma_l$ in einen zugehörigen mittleren Kreisradius der Kluft $\mu_D$ (mit Standardabweichung $\sigma_D$ ). Für drei Verteilungstypen sind die Formeln entsprechend angepasst (nach Zhang und Einstein 2000).	13
Tabelle 2.2 Die Formeln zur Umrechnung der mittleren Kluftspurlänge $\mu_l$ und deren Standardabweichung $\sigma_l$ in eine zugehörige mittleren Hauptellipsenachsenlänge der Kluft $\mu_a$ (mit Standardabweichung $\sigma_a$ ). Für drei Verteilungstypen sind die Formeln entsprechend angepasst (nach Zhang et al. 2002).	14
Tabelle 2.3 Bezeichnung zur Beschreibung der Abstände von Schichtflächen und Kluft-/Schieferungsflächen nach DIN 14689-1 (Deutsches Institut für Normung 2011).	18
Tabelle 2.4 Mögliche Umrechnungen ein- und zweidimensionaler Parameter in den dreidimensionalen Intensitätsparameter $P_{32}$ .	20
Tabelle 3.1 Technische Merkmale des Riegl VZ 400 (Riegl LMS 2014).	38
Tabelle 4.1 Zusammenfassung der gewählten Aufschlussbeispiele zur Bestimmung der Trennflächenparameter und der Erstellung eines DFN Modells.	43
Tabelle 4.2 Detaillierte Angaben zur durchschnittlichen Aufstellentfernung, Anzahl erzeugter Punkte und gewählten Winkelinkrements am Laserscanner der Scanpositionen 1-4 im Römersteinbruch. Die daraus resultierende Punktwolke, die sich aus den 4 Punktwolken zusammensetzt, wird bereinigt und die Punktzahl reduziert (über eine Octreefilterung), um eine problemlose Weiterverarbeitung zu gewährleisten. Hier erfolgt eine Auflösungsangabe über den durchschnittlichen Punktabstand.	46
Tabelle 4.3 Detaillierte Angaben zur durchschnittlichen Aufstellentfernung, Anzahl erzeugter Punkte und gewählten Winkelinkrements am Laserscanner der Scanpositionen 1-6 im Steinbruch Rockenau. Die daraus resultierende Punktwolke, die sich aus den 6 Punktwolken zusammensetzt, wird bereinigt und die Punktzahl reduziert (über eine Octreefilterung), um eine problemlose Weiterverarbeitung zu gewährleisten. Hier erfolgt eine Auflösungsangabe über den durchschnittlichen Punktabstand.	50
Tabelle 4.4 Detaillierte Angaben zur durchschnittlichen Aufstellentfernung, Anzahl erzeugter Punkte und gewählten Winkelinkrements am Laserscanner der Scanpositionen 1-7. Die daraus resultierende Punktwolke, die sich aus den 7 Punktwolken zusammensetzt, wurde bereinigt und die Punktzahl reduziert (über einen Octree-Filter), um eine problemlose Weiterverarbeitung zu gewährleisten. Hier erfolgt eine Auflösungsangabe über den durchschnittlichen Punktabstand.	56
Tabelle 5.1 Formeln zur Berechnung des wahren Einfallswinkels $\alpha$ in Abhängigkeit seiner Lage im Koordinatensystem.	60
Tabelle 5.2 Gewählte Parameter für den RANSAC Algorithmus zur Identifizierung der Flächen in der Punktwolke des Steinbruchs Rockenau.	73
Tabelle 5.3 Vergleich der berechneten Clusterzentren nach Methode 1 (plane patch filter) und Methode 2 (RANSAC). Die Ergebnisse zeigen ausgezeichnete Übereinstimmung.	75
Tabelle 5.4 Übersicht über die verwendeten Wahrscheinlichkeitsfunktionen und deren Dichtefunktionen sowie die zu berechnenden Parameter.	80
Tabelle 5.5 Ergebnisse der statistischen Tests nach Kolmogorow-Smirnow (KS-Test) für $h_{\max}$ der Kluftchar NE-SW. Jede Verteilung wurde 2500mal getestet.	83
Tabelle 5.6 Ergebnisse der statistischen Tests nach Kolmogorow-Smirnow (KS-Test) für $l_{\max}$ der Kluftchar NE-SW. Jede Verteilung wurde 2500mal getestet.	88
Tabelle 5.7 Ergebnisse der statistischen Tests nach Kolmogorow-Smirnow (KS-Test) für die Flächengrößen der Kluftchar NE-SW. Jede Verteilung wurde 2500mal getestet.	92
Tabelle 5.8 Ergebnisse der Berechnung der Flächengrößen im Steinbruch Rockenau. Auf Grundlage des Parameter $l_{\max}$ wurden die Flächeninhalte abgeleiteter Kreise, Quadrate und Rechtecke (Seitenverhältnis 2:1, 3:2 und 4:1) berechnet. Zur Einordnung der Werte sind auch die aus SplitFX ermittelten Flächengrößen, die auf Auswertung der Polygonflächen basieren, angezeigt. Die WNW-ESE Schar zeigt durchgehend die höchsten Flächeninhalte, während die NE-SW Schar die kleinsten Flächen aufweist.	94
Tabelle 5.9 Gewählte Parameter für den RANSAC Algorithmus zur Identifizierung der Flächen in der Punktwolke des Steinbruchs Rockenau.	97

Tabelle 5.10 Ergebnisse der Auswertung aller erkannten und mit der “Tracemap” verschnittenen Trennflächenspuren. Die Ergebnisse sind somit nicht durch eine Window Mapping Methode korrigiert. Die Ergebnisse sind bereits um die aus einer zu geringen Anzahl an Ausgangsdaten (Anzahl <10) berechneten Werte bereinigt. ....	97
Tabelle 5.11 Ergebnisse des Circular Window Mapping an den Kluftspuren der “Tracemap“. Sie sind somit bereits korrigiert. Die Ergebnisse sind bereits um die aus einer zu geringen Anzahl an Ausgangsdaten (Anzahl <10) berechneten Werte bereinigt. ....	98
Tabelle 5.12 Berechnung der mittleren Radien aus den durchschnittlichen Kluftspurlängen (nach Zhang und Einstein 1998). ....	101
Tabelle 5.13 Zusammenfassung der Ergebnisse der Kluftgrößenbestimmung für die 3 Kluftscharen des Steinbruchs Rockenau. Der mittlere Kluftdurchmesser $\mu_a$ (entspricht der Hauptachse der Ellipse) und dessen Standardabweichung $\sigma_a$ , das Achsenverhältnis der Ellipse $k$ , die beiden möglichen Orientierungen (bzw. Einfallwinkel) der Ellipsenhauptachse $\gamma_e^-$ und $\gamma_e^+$ sowie der zuvor bestimmte Kreisradius als Vergleichsgröße sind in der Tabelle aufgeführt. ....	104
Tabelle 5.14 Überprüfung der Ergebnisse auf ihre statistische Robustheit. Tests für 3 verschiedene Dichtefunktionen (logarithmisch-normalverteilt, negativ-exponentiell verteilt und gammaverteilt) werden für jede Kluftchar durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die negativ-exponentielle Verteilung die geringste Abweichung von linker und rechter Seite der genutzten Gleichungen (s. Kapitel 2.5.8) zeigt und somit als gewählte Dichtefunktion bestätigt wird. ....	104
Tabelle 5.15 Berechnung der Breite B, Höhe H und Fläche der Rechtecke aus den identifizierten Ellipsengrößen a, b und k. Breite und Höhe entspricht jeweils dem 0,87-fachen der jeweiligen Ellipsenachse. Als Vergleichswerte sind die Flächen der Ellipsen $A_E$ und Flächen der Rechtecke $A_R$ zusätzlich angegeben. ....	105
Tabelle 5.16 Vergleich der über die erste Methode erlangten durchschnittlichen Kluftgrößen und Parameter aus den aufgeschlossenen Kluftflächen (aus SplitFX) mit den künstlich erzeugten Kluftspurlängen $\mu(h)_i$ und $\mu_i$ aus den ermittelten Kluftgrößen (über Fracman). ....	105
Tabelle 5.17 Gewählte Parameter für den RANSAC Algorithmus zur Identifizierung der Flächen in der Punktwolke des Steinbruchs Rockenau. ....	123
Tabelle 5.18 Ergebnisse der Auswertung des Römersteinbruchs mithilfe beider vorgestellten Methoden für die Kluftscharen NW-SE (blau) und NE-SW (rot). Die Ergebnisse der Methode 2 (Längen aus SplitFX) wurden durch einen Faktor 1,5 angepasst, d. h. dass der zugrunde liegende Radius um das 1,5 fache verlängert wurde, um die Anzahl möglicher Schnittpunkte zu erhöhen (Methode 3). ....	126
Tabelle 5.19 Durchschnittliche $P_{10}$ Werte und deren Standardabweichungen für die Bemessung durch Ellipsen. Die Intensität $P_{10}$ ist inklusive des 95% Konfidenzintervalls angegeben. ....	129
Tabelle 6.1 Ergebnisse des ISIS Algorithmus für die Teilbereiche A1 bis A6. Die mittleren Orientierungen, die angenommene Verteilung sowie die KS-Wahrscheinlichkeit (Kolmogorow-Smirnow-Test) sind für jede identifizierte Kluftchar angegeben. ....	145
Tabelle 6.2 Ergebnisse des ISIS Algorithmus für die Teilbereiche A1 bis A6. Die mittleren Orientierungen, die angenommene Verteilung sowie die KS-Wahrscheinlichkeit (Kolmogorow-Smirnow-Test) sind für jede identifizierte Kluftchar angegeben. ....	145
Tabelle 6.3 Vergleich der Ergebnisse des k-means und ISIS Algorithmus‘ der einzelnen Teilbereiche im Aufschluss Eberstadt. ....	146
Tabelle 6.4 Korrigiertes Ergebnis für die Orientierung der Schichtung nach Filtern der Schuttflächen. ....	149
Tabelle 6.5 Gewählte Einstellungen des „Plane Patch Filters“ in RiSCAN Pro zur Identifizierung der Flächennormalen im Steinbruch Eberstadt. ....	159
Tabelle 6.6 Ergebnisse der Parametrisierung der Orientierung (Orient.) der Klüfte und der Intensität (Int.) der Klüftung ( $P_{10}$ ). Dargestellt sind die Clusterzentren und die durchschnittliche Intensität von 4 Trennflächenscharen der einzelnen Teilbereiche. ....	159
Tabelle 6.7 Intensitäten $P_{10}$ und die daraus errechneten Intensitäten $P_{32}$ der Hauptklüftungen der einzelnen Teilbereiche. Zusätzlich ist der zur Umrechnung benötigte Konzentrationsparameter $\kappa$ angegeben. ....	161
Tabelle 6.8 Ergebnisse der statistischen Untersuchung der Kluftlängen. ....	165

Tabelle 6.9 Ergebnisse der beiden Modelle unterschiedlicher Apertur. Gelistet sind Permeabilitätswerte für 6 unterschiedliche Raumrichtungen (xx, yy, zz, xy, yz und zx). Die Permeabilitätswerte für den Fall b sind gegenüber Fall a um den Faktor 10000 erhöht, unabhängig von der gewählten Richtung. ....	167
Tabelle 6.10 Ergebnisse des Aufskalierungsprozesses nach Oda des oberen und unteren Bereichs des Rastermodells des Steinbruchs Eberstadt. ....	171
Tabelle 6.11 Vergleich der Ergebnisse der Oda und Oda Gold Methode am Beispiel des Eberstadtmodells. ....	172
Tabelle 6.12 Ergebnisse der Oda Methode für das grobe und feine Raster, in das das DFN Modell des Steinbruchs Eberstadt aufskaliert wird. ....	173
Tabelle 6.13 Ergebnisse des dynamischen Aufskalierens des DFN Modells im Steinbruch Eberstadt. ....	174
Tabelle 6.14 Vergleich der Ergebnisse der Oda Methode und des dynamischen Aufskalierens am Beispiel des DFN Modells Eberstadt. ....	175
Tabelle 6.15 Ergebnisse der Oda Methode des Eberstadtmodells für variierende Eingabeparameter. Gegenüber dem Ausgangsmodell wird jeweils die Intensität der Klüftung verdoppelt und um eine Größenordnung erhöht, sowie die Größe der Klüfte auf 1 m bzw. 10 m festgelegt. ....	178
Tabelle 6.16 Ergebnisse der Oda Gold Methode des Eberstadtmodells für variierende Eingabeparameter. Gegenüber dem Ausgangsmodell wird jeweils die Intensität der Klüftung verdoppelt und um eine Größenordnung erhöht, sowie die Größe der Klüfte auf 1 m bzw. 10 m festgelegt. ....	179
Tabelle 6.17 Vergleich der berechneten Parameter nach der Oda und Oda Gold Methode für das in der Klüftintensität um eine Größenordnung verringerte DFN Modell des Steinbruchs Eberstadt mit angenommener konstanter Klüftgröße von 0,5 Metern. Markant ist die Abnahme der Permeabilität in den 3 Hauptrichtungen zu erkennen. ....	179
Tabelle 6.18 Ergebnisse der geomechanischen Aufskalierung am Beispiel Eberstadt. Dargestellt sind die Ergebnisse 3er Symmetrie-Typen (Isotrop, VTI und Anisotrop) und die dazu berechneten Parameter, sowohl für Modell A als auch für das hinsichtlich der Klüftintensität um eine Größenordnung veränderte Modell B. ....	185
Tabelle 6.19 Die Ergebnisse der Stabilitätsanalyse für die Verschneidung des DFN Modells mit dem digitalen Geländemodell des Steinbruchs Eberstadt. ....	190
Tabelle 6.20 Die Ergebnisse der Stabilitätsanalyse für die Verschneidung des DFN Modells mit einem Tunnel im Steinbruch Eberstadt. ....	192
Tabelle 6.21 Ergebnisse des MDS-Algorithmus. Angegeben sind die mittleren Abstände in alle 3 Raumrichtungen, der mittlere Sigmafaktor und die mittlere Größe der Volumina. ....	196
Tabelle 6.22 Ergebnisse der Blockgrößenauswertung mithilfe des Fragmentierungsrasters. ....	198
Tabelle 7.1 Übersicht über die Trennflächenparameter, deren Notwendigkeit bei der Erstellung eines DFN Modells und eine Angabe darüber, ob diese Parameter über unsere Methode der Trennflächenparameterbestimmung aus TLS Daten bestimmt werden können. Dabei werden die Methoden nach halb-automatisch und nötiger manueller Interpretation in der Punktwolke unterschieden. Zusätzlich sind einige Parameter einzig über Feldmessungen zu bestimmen. ....	205
Tabelle 11.1 Ergebnisse der statistischen Tests nach Kolmogorow-Smirnow (KS-Test) für $h_{\max}$ der Schar NW-SE. Jede Verteilung wurde 2500-mal getestet. ....	225
Tabelle 11.2 Ergebnisse der statistischen Tests nach Kolmogorow-Smirnow (KS-Test) für $l_{\max}$ der Schar NW-SE. Jede Verteilung wurde 2500-mal getestet. ....	228
Tabelle 11.3 Ergebnisse der statistischen Tests nach Kolmogorow-Smirnow (KS-Test) für $h_{\max}$ der Schar WNW-ESE. Jede Verteilung wurde 2500-mal getestet. ....	231
Tabelle 11.4 Ergebnisse der statistischen Tests nach Kolmogorow-Smirnow (KS-Test) für $l_{\max}$ der Schar WNW-ESE. Jede Verteilung wurde 2500 mal getestet. ....	234
Tabelle 11.5 Die detaillierten Ergebnisse der Auswertung der Klüftspurlängen mit Fracman. ....	243
Tabelle 11.6 Die detaillierten Ergebnisse der Klüftspurlängenauswertung mit Fracman. Die Tabelle ist bereits um die Werte bereinigt, die aus weniger als 10 Flächen bei der Berechnung stammen. ....	244



# 1 Motivation

Trennflächen beeinflussen maßgeblich die hydraulischen als auch mechanischen Eigenschaften eines Gesteins. Gerade bei der Bewertung von Kohlenwasserstofflagerstätten oder bei der Erschließung geothermaler Reservoirs ist ein breites Wissen über die Trennflächen erforderlich. Mehrere Trennflächenscharen bilden ein Netzwerk, das sowohl Permeabilität als auch Porosität für Fluide in sonst eher dichten Gesteinen bieten kann. Dieses Trennflächennetzwerk bestimmt so maßgeblich das Fließverhalten der Fluide. Das Wissen über die Trennflächen und ihre beschreibenden Parameter in Georeservoirs ist begrenzt. Quellen dieser Informationen sind beispielsweise Bohrungen oder seismische Interpretationen. Diese bieten aber nur lokale Punktinformationen (Bohrungen) oder eine grobe Auflösung (Seismik). Das Abteufen einer Vielzahl von Bohrungen ist zudem kostenintensiv. Lohnender wäre eine günstigere Alternative, die gleichzeitig Informationen über räumliche Variationen der Trennflächenparameter zulässt. Zugängliche Reservoiranaloge, beispielsweise Steinbrüche, Tunnel, Minen oder andere Oberflächenaufschlüsse bieten die Möglichkeit diese Variationen zu erfassen. Sie bilden räumliche Informationen im Meter- bis Kilometerbereich ab. Unterschiedlich orientierte Aufschlusswände einer Formation geben einen Eindruck über die Räumlichkeit der Strukturen und vorkommende Trends der Trennflächenparameter. Sofern zur identischen tektonostratigraphischen Einheit des zu untersuchenden Reservoirs gehörend, stellen diese Reservoiranaloge eine Möglichkeit dar, eine erweiterte Einsicht in das Untergrundreservoir zu erhalten. Die genaue Erfassung von Oberflächenaufschlüssen erlaubt zudem Stabilitätsanalysen von Festgesteinsböschungen oder die Bewertung eines geplanten Ausbruchs (Tunnels) durch die erfasste Gesteinsformation.

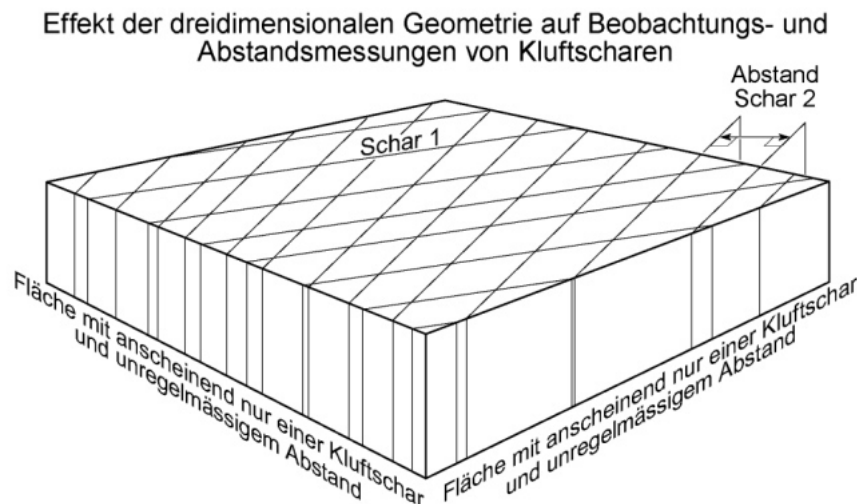
Die Trennflächenerfassung an der Oberfläche bedarf der Interpretation und Bearbeitung durch Geologen, oft traditionell mithilfe eines Maßbands und eines Geologenkompass. Seit der ersten Dekade des 21ten Jahrhunderts findet das terrestrische Laserscanning (TLS) immer mehr Anwendung bei der Erfassung von geologischen Oberflächenstrukturen. Letztere stellen zunächst eine Erweiterung zu den händisch aufgenommenen Daten dar. Die komplette dreidimensionale Erfassung von Oberflächen und deren Weiterbearbeitung in Computermodellen erlaubt unter anderem die Quantifizierung von Trennflächenparametern. Solche Modelle liefern eine umfangreiche Datenbasis, auf deren Grundlage jede Trennfläche untersucht werden kann. Die dadurch expandierte Datenbasis lässt statistisch signifikante Aussagen über das vorherrschende Trennflächengefüge zu.

Es ist die Motivation dieser Arbeit die Schritte der Quantifizierung der Trennflächenparameter aus den durch das terrestrische Laserscanning gewonnenen 3D-Modellen möglichst zu automatisieren. Nur dann, wenn Trennflächenparameter nicht durch einen Bearbeiter einzeln manuell erfasst, sondern mithilfe von Algorithmen autark erlangt werden, stellt diese Methode eine enorme Zeitersparnis dar und liefert ein präzises Abbild der aufgenommenen Realität. Viele der bisher entwickelten Methoden basieren noch zu stark auf manuellem Einsatz.

Zusätzlich kann die große Datenbasis genutzt werden, um statistisch signifikante Discrete-Fracture-Network (DFN) Modelle zu erstellen. Diese Modelle setzen sich aus deterministischen und statistischen Eingabeparametern zusammen, repräsentieren das Trennflächennetzwerk in einem Reservoir und dienen der Berechnung hydraulischer Parameter. Die durch das terrestrische Laserscanning erfassten räumlichen Variationen der Resultate spiegeln sich auch im fertigen DFN Modell wider. Diese Modelle erlauben Vorhersagen über das Verhalten von Fluiden in Reservoirs und können zudem bei Fragestellungen aus dem Bereich der Geomechanik und für Stabilitätsanalysen genutzt werden. Die statistische Signifikanz der Eingabeparameter und damit aller auf dem DFN Modell basierenden Parameter wird durch den Einsatz eines terrestrischen Laserscanners erhöht, da dieser eine hohe Datengrundlage bildet.

Diese Arbeit soll den Nachweis der praktischen Tauglichkeit der entwickelten Methoden aufzeigen und einen kompletten Arbeitsablauf von der Erfassung der Aufschlüsse im Gelände mit dem terrestrischen Laserscanner über die Auswertung der Trennflächenparameter bis hin zur Erstellung eines DFN Modells aus diesen Daten aufzeigen. Der bei der Bearbeitung der Punktwolken, die durch das Laserscanning gewonnen werden, manuelle Input bestimmt die Praktikabilität und den Erfolg der notwendigen Methoden, da die Bearbeitung großer Datensätze zeitintensiv ist und nur eine Reduzierung des manuellen Einsatzes - und somit der Bearbeitungszeit - den Einsatz des terrestrischen Laserscannings rechtfertigt. Die aufgezeigten (semi-)automatischen Prozesse unterliegen ähnlichen

Herausforderungen wie eine händische Aufnahme. Insbesondere der durch den natürlichen Aufschluss geformte Anschnitt des Kluftnetzwerks beeinträchtigt maßgeblich gewonnene Kluftparameter. Dieser „Anschnitteffekt“ führt zu einer Über- oder Unterschätzung der gewonnenen Intensität der Klüftung oder der Kluftgröße (Abbildung 1.1). Für eine exakte Erfassung eines Kluftnetzwerks und seiner Parameter muss diese Verzerrung der Ergebnisse auf ein Minimum reduziert werden. Ansätze dazu werden in dieser Arbeit vorgestellt.



**Abbildung 1.1** Schematische Darstellung eines Kluftnetzwerks bestehend aus 2 Scharen und 2 Anschnitten einer Aufschlusswand. Je nach Anschnittwinkel der sichtbaren Aufschlussfläche relativ zum Kluftnetzwerk variieren die messbaren Abstände, Intensitäten und Größen der Klüfte (aus Burg 2015). Links sind die Kluftabstände scheinbar geringer und weniger regelmäßig als an der rechten Aufschlusswand.

### **Einleitung**

Die vorliegende Arbeit teilt sich in 2 Hauptkapitel.

Im ersten Hauptteil wird die Methodik der Auswertung erläutert. Dort werden die Arbeitsschritte und entwickelten Methoden detailliert aufgeführt mit denen aus Punktwolken, die durch das terrestrische Laserscanning gewonnen werden, Trennflächenparameter bestimmt werden. Dieses Methodik-Kapitel teilt sich in 3 Unterkapitel, die die Bestimmung der Orientierung und Länge von Trennflächen sowie die Intensität (oder Dichte) der Trennflächenscharen expliziert.

Im zweiten Kapitel geht es um die Erstellung und Anwendung von DFN Modelle. Dies erfolgt an einem Beispielaufschluss, der komplett mit den Methoden des vorigen Kapitels ausgewertet wird. Neben den theoretischen Grundlagen werden die Erstellung des fertigen Modells, die Auswertung hydraulischer sowie geomechanischer Parameter und Stabilitätsanalysen in dieser Arbeit präsentiert. Alle Arbeitsprozesse werden an insgesamt 3 Aufschlussanalogon vorgestellt. Eine Beschreibung im Hinblick auf ihre Geologie und Lokation findet sich in Kapitel 4.

## 2 Grundlagen

Das Grundlagenkapitel soll im Folgenden eine Übersicht der Trennflächenparameter und deren händische Quantifizierung im Aufschluss bieten, auf denen die automatisierten Auswertemethoden aus Punktwolken im Wesentlichen aufbauen.

### 2.1 Charakterisierung von Trennflächen

Als Trennfläche bezeichnet man allgemein diejenige Fläche, die ein Gestein aufteilt bzw. spaltet oder eine Fläche, die eine chemische oder physikalische Veränderung markiert (Hack, Henri Robert George Kenneth 1996). Diese Abtrennungen oder auch Diskontinuitäten können sedimentären, diagenetischen und mechanischen (tektonischen) Ursprungs sein. Sie haben eine sehr geringe bis nicht vorhandene Zugfestigkeit und werden über ihre Scherfestigkeit charakterisiert. Die Anwesenheit von Trennflächen beeinflusst in erheblichem Maße das geomechanische und hydraulische Verhalten des Gesteins. Die Trennflächenparameter - darunter ihre Ausbildung, Häufigkeit und Orientierung - bestimmen dann maßgeblich die Eigenschaften des Gesteinskörpers. Trennflächen und Gesteinskörper bilden eine Gesamtheit und kontrollieren gemeinsam alle Eigenschaften und Charakteristika, wie den Fluidfluss durch viele Gesteine. Bei der Bestimmung hydrogeologischer Parameter sind sie einer der wichtigsten geologischen Einflussfaktoren. Die Trennflächen, insbesondere Klüfte, dienen als Durchflussbahnen und Speicher der Fluide im Gestein (Singhal und Gupta 2010).

Im Felsgestein vorkommende Trennflächen spielen zudem eine wichtige Rolle bei der Bestimmung von Stabilitäten, beispielsweise an Hängen oder in Tunneln. Zu den Trennflächen zählt man beispielsweise Klüfte, Schichtflächen, Störungen, Schieferungsflächen, Adern, Foliationen und Laminationsflächen (González de Vallejo, Luis I. und Ferrer 2011).

Gemäß der DIN 14689-1 (Deutsches Institut für Normung 2011) gehören zu den Trennflächen unter anderem Schichtflächen, Klüfte, Scherflächen, Verwerfungen, Spalten, Schieferungsflächen. Ihre Zug- und Scherfestigkeit ist geringer als die des Gesteins. Viele Parameter zur Klassifizierung und Analyse von Trennflächen sind in der DIN-Norm aufgelistet, können aber um einige Punkte erweitert werden. Eine komplette Übersicht aller bestimmbarer Größen (Abbildung 2.1) liefern die folgenden Kapitel, in denen jeder einzelne Parameter beschrieben wird.

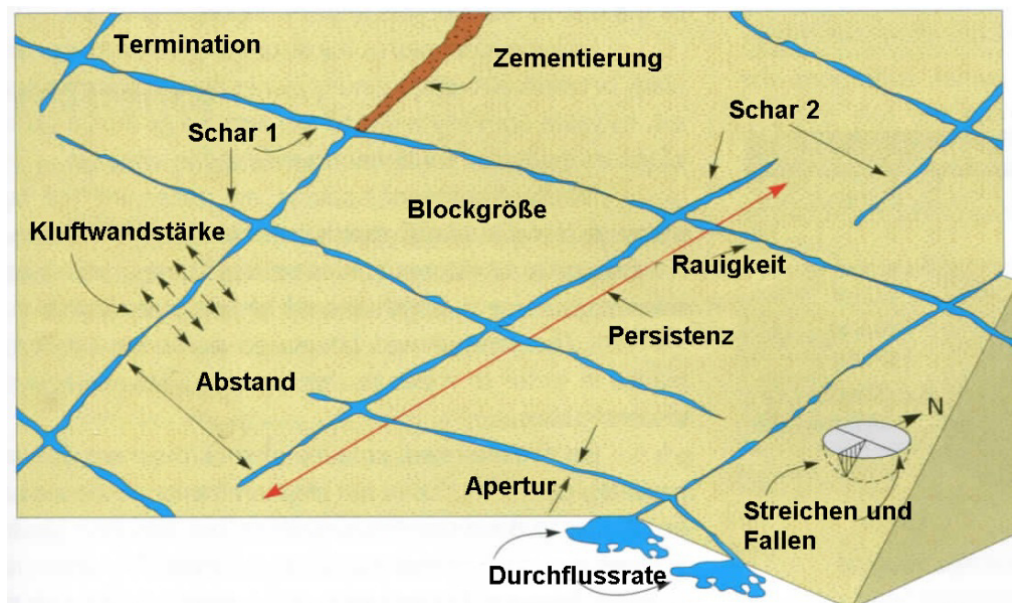


Abbildung 2.1 Schaubild verschiedener Trennflächen- bzw. Kluftparameter an einer Aufschlusswand (verändert nach Hudson und Harrison 1997 und González de Vallejo, Luis I. und Ferrer 2011).

## 2.2 Raumlage

Diese gibt die Orientierung der Trennfläche im Raum, angegeben durch Einfallrichtung und -winkel bzw. Streichen und Fallen, wieder. Die Raumlage oder auch **Raumstellung** (Deutsches Institut für Normung 2011) wird generell mithilfe eines Gefügekompasses ermittelt, wobei entweder die Einfallrichtung und der Einfallswinkel (Clar Notation) oder Streichrichtung und Einfallswinkel bestimmt werden (Abbildung 2.1). Die Einfallrichtung und Streichrichtung werden im Uhrzeigersinn von Nord aus ( $0^\circ$ ) gemessen und stets durch 3 Stellen angegeben (von  $0^\circ$ - $360^\circ$ ). Der Einfallswinkel wird zwischen  $0^\circ$  (horizontale Fläche) und  $90^\circ$  (senkrechte Fläche) sowie stets mit 2 Ziffern angegeben ( $00^\circ$ - $90^\circ$ ). Der Einfallswinkel wird immer hinter der Einfallrichtung bzw. Streichrichtung niedergeschrieben (bspw. 186/40).

Orientierungen von Trennflächen und insbesondere Klüften können anhand eines Bohrkerns oder einer Aufschlusswand erfasst werden. Im Gelände werden dazu mithilfe eines geologischen Kompasses die Orientierungen der Flächen entlang einer Scanline eingemessen (Zhang 2005). Die Orientierung von Trennflächen ist das Ergebnis mechanischer, thermaler und chemischer Prozesse (Hudson und Harrison 1997), wie beispielsweise strukturgeologischer Prozesse der Faltung oder Bruchbildung unter verschiedenen Stressregimen im Felsgestein (siehe auch Kapitel 2.9).

### 2.2.1 Darstellung der Orientierungen

Einfallrichtungen werden im Uhrzeigersinn von Nord ausgehend zwischen  $0^\circ$  und  $360^\circ$  gemessen und der Einfallswinkel zwischen  $0^\circ$  (horizontal) und  $90^\circ$  (vertikal) mit einem Klinometer ermittelt (González de Vallejo, Luis I. und Ferrer 2011). Die Ergebnisse der Orientierung können auf unterschiedliche Weise graphisch dargestellt werden (Wallbrecher 1986, Meschede 1994, González de Vallejo, Luis I. und Ferrer 2011):

- In einer stereographischen Projektion werden Raumlagen durch Polpunkte oder als Großkreise (untere Hemisphäre) eingezeichnet.
- In Klüftrosen können die Einfallrichtungen in Klassen aufgeteilt dargestellt werden.
- In Blockdiagrammen beziehungsweise als Histogramme können entweder die Einfallrichtungen oder die Einfallswinkel geplottet werden.
- Als Symbole auf geologischen Karten können die Orientierungen verschiedener Strukturen eingetragen werden.

Die graphische Darstellung erleichtert das schnelle visuelle Erfassen und Bewerten der ermittelten Orientierungen. Auf der Grundlage von Polpunkt- und Großkreisdarstellungen werden weitere Interpretationen vorgenommen, wie die Bestimmung von Faltenachsen, Winkelbestimmungen zwischen Flächen und die Festlegung von Polpunkt-Clustern.

## 2.3 Schar

Dieser Parameter beschreibt die Anzahl der Trennflächenscharen in einem Gestein und ordnet die Trennflächen in einer Schar. Diese Zuordnung geschieht aufgrund gleicher Orientierung oder Trennflächentyps bei identischer Genese. Diese Einteilung kann mathematisch über eine Clusteranalyse berechnet werden.

### 2.3.1 Einteilung in Scharen (Clusteranalyse)

Die in einer stereographischen Projektion dargestellten Orientierungswerte müssen in Scharen untergliedert werden. So ist eine eindeutige Identifizierung unterschiedlicher Trennflächenscharen möglich. Cluster und Clusterzentren können durch das menschliche Auge bestimmt werden. Die äußeren Grenzen eines Clusters werden beispielsweise durch eine Spannweite an Einfallrichtungen und -winkel angegeben, die durch ein manuelles Abgrenzen des Interpretierenden festgelegt werden (Priest 1993). Viele Datensätze gestalten sich aber kompliziert und erschweren so die Interpretation, die zudem abhängig von vielen subjektiven Einflüssen ist. Daher werden mathematische Verfahren bei der Identifizierung von Scharen genutzt. Dazu zählt unter anderem ein „k-means“ Algorithmus.

Clusteranalysen helfen dabei Gruppierungen in Datensätzen zu identifizieren (Kaufman und Rousseeuw 1990). Sie können auf Grundlage der Annahme, dass die Klüftung in Gesteinen sich in



mehrere Scharen mit charakteristischen Einfallsrichtungs- und Einfallswinkel unterteilt, zur Auswertung herangezogen werden. Die aus der Normalauswertung bestimmten Orientierungen werden als Polpunkte in eine stereographische Projektion geplottet. Es wird nun geprüft, ob die Polpunkte Bereiche erhöhter Punktdichte bilden und somit die Werte um bestimmte Mittelwerte aus Einfallswinkel und Einfallrichtung angeordnet sind. Zugehörige Vektoren um solch einen Mittelpunkt werden einem Cluster zugeordnet. Ziel ist es, die richtige Anzahl solcher Cluster zu ermitteln. Dazu wird eine automatische Clusteranalyse auf Grundlage eines k-means Algorithmus genutzt (MacQueen 1967). Jedes Cluster steht am Ende charakteristisch für eine Kluftschär (identifiziert über dessen Orientierung). Die maximale Anzahl möglicher Cluster  $k_c$  ist theoretisch unbegrenzt. Zur Bestimmung eines Clusters ist es weiterhin notwendig, vor Beginn die Anzahl der Cluster  $k_c$  abzuschätzen.

Der k-means Algorithmus zielt darauf ab, die durchschnittliche quadrierte Distanz eines Punktes zu einem möglichen Clusterzentrum zu minimieren (Ester und Sander 2013). Es gilt

$$d_c(X_i, v_j) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_c} \|X_i - v_j\| \quad 2.1$$

mit  $n$  als maximale Anzahl an Datenpunkten,  $X$  den betrachteten Punkten,  $v$  den theoretischen Clusterzentren und  $k_c$  der Anzahl der möglichen Clusterzentren.

Die Distanz  $d(X_i, v_j)$  soll hierbei minimiert werden. Die Schwäche des Algorithmus‘ liegt sicherlich darin begründet, dass die Anzahl  $k_c$  der Cluster vorgegeben werden muss. Das führt dazu, dass bei der Auswertung der Orientierungsdaten mehrere Clustertests durchgeführt werden müssen, bis die Ergebnisse ein stimmiges Bild ergeben. Oft kommt es vor, dass Bereiche mit sehr hoher Punktdichte andere vermeintliche Cluster mit niedriger Punktdichte derart überlagern, dass keine mathematische Lösung gefunden werden kann. Hier empfiehlt sich eine manuelle, erweiterte Interpretation (siehe auch Kapitel 6.4.5). Die Ergebnisse einer Clusteranalyse oder einer manuellen Einteilung der Scharen erzeugen klassifizierte Orientierungswerte. Je nach Einteilungsmethode gehören manche Punkte mehreren Scharen an oder auch gar keiner. Unberücksichtigte Punkte können als zufällige, isotrope oder hintergründige Komponenten der Trennflächenorientierungen angesehen werden (Priest 1993).

Bei der Aufnahme von Trennflächenorientierungen entlang einer Scanline kommt es zu einer Orientierungsverzerrung (siehe Kapitel 7.2). Je nach Winkelstellung von Aufschlussorientierung und Orientierung der Kluft zueinander kommt es zu einer Unterrepräsentation einer Kluftschär in den Ergebnissen. Um diese auszugleichen, können Wichtungsfaktoren eingeführt und auf die Ergebnisse angewendet werden (Priest 1993). Diese Wichtungsfaktoren spielen eine große Rolle, wenn ein Dichteplot oder die durchschnittliche Orientierung eines Clusters bestimmt werden soll. Bei der Erstellung der Plots oder der Cluster werden dann Orientierungspunkte unterschiedlich gewichtet. Der Wichtungsfaktor  $w$  berechnet sich über (Terzaghi 1965):

$$w = \frac{1}{\cos \varepsilon} \quad 2.2$$

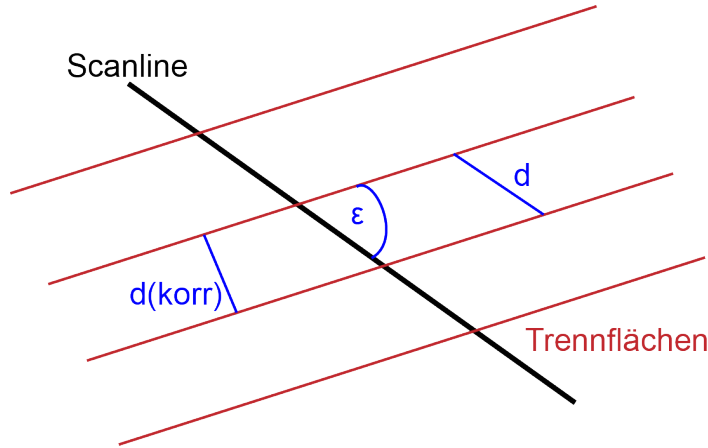
Der Winkel  $\varepsilon$  ist der Winkel zwischen der Orientierung der Scanline und der Orientierung der Trennflächen (Abbildung 2.2). Die Summe aller Wichtungsfaktoren  $N_w$  ist nach (Priest 1993):

$$N_w = \sum_{i=1}^{N_{nw}} w_i \quad 2.3$$

Dieser Faktor  $N_w$  gibt einen ersten Eindruck der Gesamtverzerrung der Daten. Jeder Vektor wird nun über einen normalisierten Wichtungsfaktor  $w_{ni}$  korrigiert (Priest 1993, Zhang 2005):

$$w_{ni} = \frac{w_i N_{nw}}{N_w} \quad 2.4$$

Jede Normalkomponente der Orientierungen wird um diesen Faktor  $w_{ni}$  korrigiert, um die Wichtung erfolgreich anzuwenden.



**Abbildung 2.2** Schematische Darstellung einer Trennflächenschar (rot), die mithilfe einer Scanline (schwarz) vermessen wird. Aufgrund einer Orientierungsverzerrung bedingt durch die Orientierung der Scanline relativ zur Trennflächenorientierung und der Orientierung der Aufschlusswand ist eine Wichtung der Ergebnisse als Ausgleich notwendig. Der Wichtungsfaktor ermittelt sich aus dem Kosinus des Winkels zwischen Scanline und Raumlage der Trennflächen.

Im Anschluss müssen die einem Cluster zugeordneten Werte weiter statistisch geprüft werden. Um die Richtigkeit der Zugehörigkeit der Punkte zu einem Cluster zu prüfen, bietet sich eine Untersuchung an, die aufzeigt, ob die Punkte normalverteilt sind. Solche statistischen Untersuchungen an Vektordaten (nichts anderes stellen Orientierungswerte dar) bezeichnet man häufig als Fisher-Statistik (Fisher et al. 1987). Die Fisher-Statistik erlaubt beispielsweise die Streuung der Orientierungswerte direkt zu quantifizieren, ausgehend von der Annahme, dass die Richtungsvektoren um einen Mittelwert gemäß einer Normalverteilung streuen (Abbildung 2.3). Die Streuung wird über einen abweichenden Winkel  $\alpha_k$  und einen Konzentrationsparameter  $\kappa$  (auch Fisher-Konstante) beschrieben. Die zugehörige Wahrscheinlichkeitsdichte-Funktion  $P_{dA}$ , gibt „die Wahrscheinlichkeit des Auffindens einer Richtung innerhalb einer Winkelfläche  $dA$  für jede Einheitswinkelfläche“ an, „die zentriert um den wahren Mittelpunkt mit einem Winkel  $\alpha_k$  liegen“ (Tauxe et al. 2013) und lautet:

$$P_{dA}(\alpha_k) = \frac{\kappa}{4\pi \sin \kappa} e^{\kappa \cos \alpha} \quad 2.5$$

Sie gibt also an wie die Richtungen verteilt sind bzw. sie ermittelt die Wahrscheinlichkeit mit der ein bestimmter Vektor innerhalb des Raumes durch den Winkel  $\alpha_k$  zwischen diesem Vektor und der wahren, mittleren Richtung aufgespannt ist. Der Konzentrationsparameter  $\kappa$  ist ein Präzisionsparameter. Geht dieser gegen Unendlich, so ist die Streuung gleich null. Er ist gleich 0 für eine Verteilung von Vektoren in alle Raumrichtungen.

Der Konzentrationsparameter  $\kappa$  kann angenähert werden über (Tauxe et al. 2013)

$$\kappa \simeq k_a = \frac{N - 1}{N - \bar{R}} \quad 2.6$$

mit  $N$  als Gesamtzahl der Messungen und  $\bar{R}$  als der Länge der Vektorsumme aller Orientierungen.

Nicht immer sind Orientierungswerte gleichmäßig in einem Kreis um einen Mittelwert verteilt, sodass man von einer Fisher-Verteilung sprechen kann. Elliptische Verteilungen lassen sich beispielsweise besser über eine Kent-Verteilung oder eine bi-modale Verteilung mithilfe der Bingham Verteilung (Tauxe et al. 2013) beschreiben.

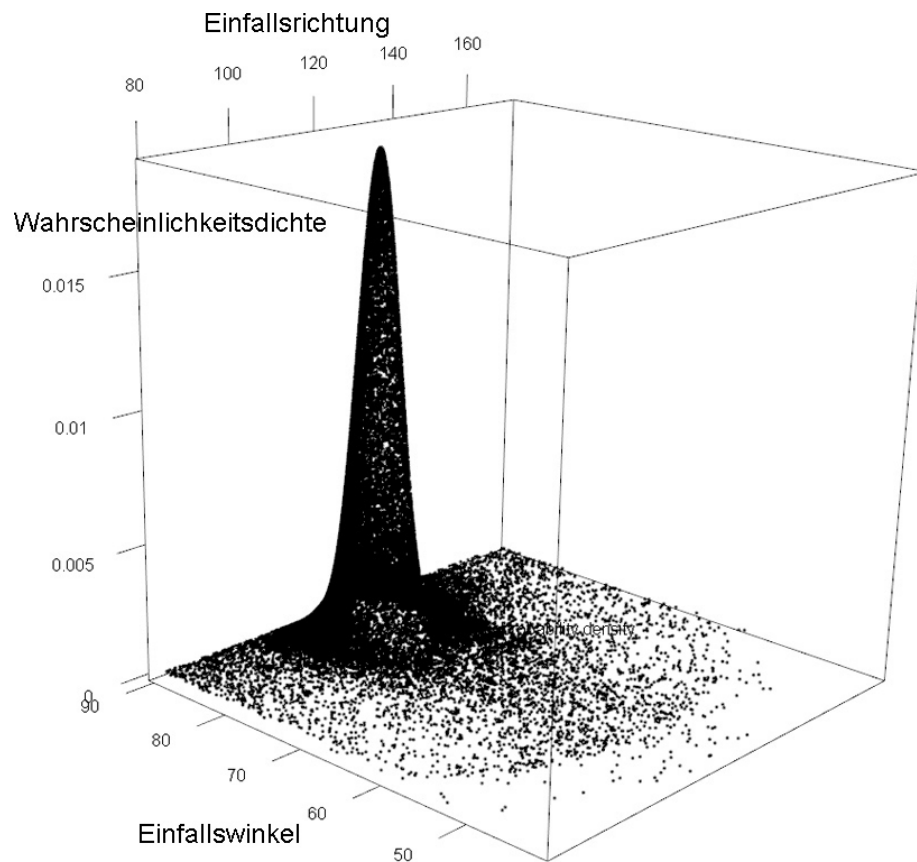


Abbildung 2.3 Kreisförmige Verteilung der Orientierungswerte (sphärische Normalverteilung) um einen Mittelpunkt. Die Verteilung ist ein guter Hinweis auf eine Fisher-Form. Dargestellt sind hier die Werte der Kluftchar NW-SE des Römersteinbruchs.

## 2.4 Persistenz

Persistenz ist ein Maß für die Anzahl sichtbarer Kluftspuren im Aufschluss und lässt Rückschlüsse auf die wahre Kluftgröße zu. Die Persistenz entspricht auch dem Durchtrennungsgrad. Dieser beschreibt den ebenen Kluftflächenanteil und ist ein Maß dafür, wie stark das Gebirge in einer Kluftebene durchtrennt ist (Verlag 2002). Näheres zu Kluftspuren und deren Nutzen bei Bestimmung der Kluftgröße findet sich in Kapitel 2.5.

## 2.5 Geometrie

Die Geometrie steht stellvertretend für **Größe** und **Form** der Kluft. Die Geometrie von Klüften kann nur angenähert werden, da sie im Aufschluss nicht eindeutig quantifizierbar ist. Die folgenden Unterkapitel erläutern den theoretischen Hintergrund bei Abschätzung der Form und Größe.

### 2.5.1 Form von Trennflächen

Die Form von Trennflächen wird in der Geowissenschaft seit Jahrzehnten diskutiert, doch die wahre Form von Trennflächen lässt sich kaum vorhersagen und ist Gegenstand der Forschung und unterschiedlicher Interpretationen (Warburton 1980, Zhang 2005). Im Speziellen behandeln die folgenden Absätze Form und Größe von Klüften, die meist häufigsten Vertreter von Trennflächen im Gestein. Beide sind bei der Ermittlung hydraulischer Eigenschaften wichtige Anhaltspunkte. Auch in der Literatur wird zumeist auf die planare Form von Klüften eingegangen und weniger direkt auf

Störungen oder Schieferung. Letztere unterstehen schon während ihrer Bildung anderen geologischen Bedingungen und spielen beispielsweise eine untergeordnete Rolle bei der Charakterisierung von „Naturally Fractured Reservoirs“. Somit sind sie auch in Hinblick auf mögliche Discrete-Fracture-Network-Modelle solcher Reservoirs weniger beeinflussend als die Klüfte. Der nachfolgende Fokus dieses Kapitels liegt daher eben auf jenen Klüften als wichtigsten Vertretern der Trennflächen.

Im Allgemeinen werden 3 verschiedene Theorien bei der Interpretation der Trennflächenform vertreten.

- 1) Trennflächen sind **kreisförmig**: Auch auf Grundlage der mathematischen Einfachheit werden Trennflächen als Kreise idealisiert. Bei der Berechnung der Größe der Fläche aus Kluftspuren erweisen sich idealisierte Kreise als optimale Lösung (La Pointe et al. 1993, Zhang und Einstein 2000, Zhang und Einstein 1998).
- 2) Trennflächen sind **rechteckig**: Geländeuntersuchungen führen zu der Annahme, dass insbesondere Klüfte in Sedimentgesteinen eine rechteckige Form aufweisen, die entlang ihrer Streichrichtung die maximale Kantenlänge aufweisen (Priest 1993, Wang 2005; Decker et al. 2006). Messungen entlang der Streich- und Einfallsrichtung ergeben somit die Kantenlängen des Rechtecks. Weiterhin sind die Klüfte meist orthogonal zur Schichtung in Sedimentgesteinen ausgerichtet (Priest 1993).
- 3) Trennflächen sind **elliptisch**: Häufig werden Trennflächen und besonders Klüfte als Ellipsen beziehungsweise Polygone mit hoher Seitenanzahl dargestellt (Zhang et al. 2002). In der Literatur wird stellenweise ein Achsenverhältnis von 2 zu 1 für die Ellipsen angenommen (Petit et al. 1994).

Insgesamt kann man 2 unterschiedliche Formen ausmachen und nach ihrer Entstehung unterscheiden. Zum einen elliptische und runde Klüfte, die nicht von benachbarten geologischen Strukturen wie einer Schichtung begrenzt und zum anderen rechteckige Klüfte, deren Ränder durch durchschneidende geologische Strukturen beeinflusst sind (Zhang und Einstein 2010). Bei der Beurteilung im Gelände, welche Form die vorliegenden Trennflächen und insbesondere die Klüfte haben, muss der geologische Rahmen erfasst werden, auf dessen Grundlage bestimmt werden kann, ob Klüfte beispielsweise durch geologische Strukturen wie einer Schichtung in Sedimentgestein begrenzt sind und sich somit rechteckig ausbilden, oder ob die Klüfte elliptisch (bzw. rund) sind (Zhang und Einstein 2010).

### 2.5.2 Größe von Trennflächen

Um die Trennflächengröße zu beschreiben, werden Begriffe wie Länge bzw. Persistenz eingeführt. Die Größe ist ein wichtiger Parameter bei der Beschreibung von Felsgestein, denn selbige beeinflusst maßgeblich die Verbindung zwischen verschiedenen Trennflächen (und auch Scharen) und daraus folgernd auch Parameter wie die Permeabilität oder Stabilität (La Pointe et al. 1993).

(Hudson und Harrison 1997) beschreibt die Persistenz als laterale Ausdehnung einer Trennfläche. Diese wird optimal entlang der Streichrichtung und der Einfallsrichtung gemessen (Cruden 1977, González de Vallejo, Luis I. und Ferrer 2011). Um die Form einer Trennfläche zu bestimmen, wird oft die Länge der Fläche in Streichrichtung und Einfallsrichtung herangezogen. Das Verhältnis der beiden Längen zueinander spiegelt dann angenähert die Form der Fläche wider.

Oft sind Trennflächen nur als sichtbare „Kluftspur“ bzw. „Trennflächenspur“ im Felsgestein aufgeschlossen. Diese werden dann direkt über ihre Länge eingemessen, dokumentiert und später mit der eigentlichen Größe der Kluft korreliert (Pahl 1981, Zhang und Einstein 1998, Zhang 2005). Ein direktes Einmessen der Trennflächenkörper in ihrer Größe und die Bestimmung ihrer Form sind nicht möglich, außer man würde den gesamten Gesteinskörper sukzessive entfernen (Jin et al. 2014). In den folgenden Kapiteln wird nun nur noch der Terminus der „Kluftspurlänge“ statt „Trennflächenspurlänge“, sowie „Kluft“ statt dem allgemeineren „Trennfläche“, verwendet. Wie im Kapitel zuvor bereits erwähnt, sind die Klüfte nicht nur eine der wichtigsten Vertreter der Trennflächen, auch aufgrund ihrer oft großen Anzahl im Gestein unterliegen die Klüfte meistens verschiedenen Methoden zu Quantifizierung ihrer Parameter.

### 2.5.3 Kluftspurlänge

Die Kluftspurlänge ist der wichtigste Parameter zur Quantifizierung von Trennflächen- bzw. Kluftgrößen. Derzeit gibt es keine allgemein gültige und einheitliche Methode zur Messung der Kluftlänge (Hudson und Harrison 1997). Allerdings existieren eine Reihe von Methoden, die versuchen, die Längen zu erfassen und ein exaktes Ergebnis anzugeben. Man unterscheidet hierbei verschiedene Ansätze für die Aufnahme im Aufschluss, des Beprobens entlang einer **Scanline** (eindimensional gezogener Linie) (Priest und Hudson 1981) oder innerhalb eines zweidimensionalen Beprobungsfensters (**window mapping**) (z.B. Kulatilake, P. H. S. W. und Wu 1984, Priest 1993). Bei der Scanline-Methode werden alle die Scanline schneidenden Kluftspuren (komplett sichtbare, nur ober- oder unterhalb der Scanline verlaufende und zensierte Spuren) in ihrer Länge gemessen. Nach (Zhang und Einstein 1998) kann die durchschnittliche Länge von Kluftspuren über ein „**circular window sampling**“ bestimmt werden. Ein kreisrunder Beprobungsrahmen wird über die Aufschlusswand gespannt. Aus dem Radius des Rahmens sowie über das Zählen von Spuren deren beiden Enden, nur ein Ende oder kein Ende der Spur im Beprobungsfenster liegen, wird die durchschnittliche Kluftspurlänge abgeschätzt (vgl. auch Mauldon 1998, Mauldon et al. 2001). Weiterhin können auch rechteckige Beprobungsfenster genutzt werden (Pahl 1981, Kulatilake, P. H. S. W. und Wu 1984). Nach (Wu et al. 2011) liefert diese Methode, wenn richtig korrigiert, die genaueren Ergebnisse.

Die Ergebnisdarstellung, unabhängig von der gewählten Quantifizierungsmethode der Kluftspurlängen, erfolgt meist in Form einer Häufigkeitsverteilung der ermittelten Werte oder vereinfacht als Mittelwert. Die Darstellung erfolgt einzeln für Kluftscharen oder für die Gesamtheit aller vorkommenden Trennflächen.

Die im Aufschluss sichtbare Kluftspur ist durch die zugrundeliegende Gesamtgröße der Kluft bedingt. Da die komplette Fläche selten sichtbar aufgeschlossen ist, kann die wahre Verteilungsfunktion der Längen nicht bestimmt werden. Trennflächen, vor allem Klüfte, terminieren oder durchtrennen sich gegenseitig. Unter der Annahme, Trennflächen besäßen eine elliptische oder kreisrunde Form, ergibt der Verschnitt der Aufschlusswand mit dem Trennflächengefüge, dass Trennflächenspuren Sekanten und flache Oberflächen die Schnittfläche selbst abbilden. Die Spuren sind somit nichts anderes als die Verschnidungslinien planarer Trennflächen mit der aufgeschlossenen, planaren Felswand (Priest und Hudson 1981). Die wahre Kluftgröße bleibt folglich meist verborgen (Priest 1993). Es kann davon ausgegangen werden, dass die wahre Länge größer als der gemessene Wert ist.

### 2.5.4 Korrelation von Längen mit zugrundeliegender Kluftgröße

An Aufschlusswänden oder in Bohrungen kann die Größe der Kluftflächen nicht direkt gemessen werden. Stattdessen werden sogenannte Kluftspuren (oder allgemein für alle Trennflächenarten „Trennflächenspuren“) eingemessen, aus denen die Kluftgrößen ermittelt werden. Dargestellt werden die Ergebnisse als Verteilungs- bzw. Dichtefunktion. Zur Beschreibung werden die durchschnittliche Kluftlänge  $\mu_l$  („mean trace length“) und die Standardabweichung  $\sigma_l$  der Ergebnisse benötigt und abgeschätzt, welche Verteilungstheorie zu den Ergebnissen der Kluftspurmessung passt. In der Regel sind das Exponential-, Lognormal-, Gamma oder Power-Law- (Potenzgesetz) Verteilungen (siehe auch Tabelle 5.4). Aus der Verteilung der sichtbaren und messbaren Längen von Kluftspuren wird auf die zugrundeliegende Größe der Klüfte geschlossen, da beide miteinander korrelieren (Pahl 1981, Zhang und Einstein 1998, Zhang 2005).

Hierbei werden zwei Ansätze unterschieden, zum einen die Ableitung der wahren Kluftgröße aus Kluftspuren, die idealisiert auf einer unendlich-großen Oberfläche verteilt sind und zum anderen eine „Trial-and-Error“-Methode (Jin et al. 2014). Letztgenannte Methode fällt unter das „Forward Modeling“, hier wird sich der wahren Form und den Parametern der Verteilungsfunktion der Kluftgrößen iterativ angenähert bis ein befriedigendes Ergebnis erreicht wird (La Pointe et al. 1993).

Bei der erstgenannten Methode wird aus der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Trennflächenspuren auf einer unendlich großen Fläche die Wahrscheinlichkeitsfunktion der Trennflächengröße bestimmt. Auf Grundlage der Messungen der Kluftspurlängen  $g(l)$  im Aufschluss oder an einer Bohrung wird zunächst versucht, die wahre Verteilung von Kluftlängen  $f(l)$  zu bestimmen. Die Verteilung  $g(l)$  spiegelt die Länge aller Trennflächenspuren auf einer Aufschlussfläche mit finiter Ausdehnung wieder. Die Funktion  $f(l)$  ist die bereits um Verzerrungen korrigierte Verteilung auf einer infiniten Fläche und wird schlussendlich herangezogen, um die Verteilung der Kluftflächengrößen zu

bestimmen (Zhang und Einstein 2000). Die folgenden Abschnitte zeigen auf, wie aus der Quantifizierung der Kluftspurlängen  $g(l)$  die Kluftlängen  $f(l)$  und die Kluftgrößen bestimmt werden. Betrachtet werden dabei 3 Möglichkeiten:

1. Die Kluftfläche wird als kreisrund angenommen, die Verteilungsfunktion der Durchmesser  $g(D)$  der Kreise wird bestimmt.
2. Die Kluftflächen werden als Ellipsen angenähert und die Verteilung der Hauptachsenlängen  $g(a)$  der Klüfte berechnet.
3. Aus den Ellipsen werden Rechtecke angenähert, um mögliche rechteckige Kluftformen widerzuspiegeln.

Zahlreiche unterschiedliche Ansätze bestehen, um  $g(l)$  im Gelände zu bestimmen,  $f(l)$  aus dieser zu berechnen und das Resultat  $g(D)/g(a)$  zu ermitteln. Sie unterscheiden sich in der Aufnahmemethode als auch in den grundlegenden Annahmen über beispielweise Trennflächenform und Lage im Raum. (Warburton 1980) beschreibt die Klüfte als flache, runde Scheiben, die poissonverteilt und parallel zueinander im Einheitsvolumen liegen oder auch als Parallelogramme (Warburton 1980b). Klüfte werden in seinem Modellansatz entlang einer Scanline erfasst. Anhand stereologischer Beziehungen zwischen der Verteilung der Kluftspurlängen und dem Durchmesser der Trennflächen wird die Verteilung der Trennflächengrößen berechnet (Warburton 1980, Zhang und Einstein 2000, Jin et al. 2014). Zhang (Zhang et al. 2002) erweitert diesen Ansatz durch die Nutzung von repräsentativen Ellipsen statt Kreisen.

### 2.5.5 Aufnahme und Berechnung der Kluftspurlängen

Die durchschnittliche Kluftspurlänge („mean trace length“)  $\mu_l$  einer Verteilung  $f(l)$  auf einer Fläche infiniter Ausdehnung kann über das „circular window sampling“ angenähert werden. Ein rundes Beprobungsfenster infiniter Ausdehnung wird über die Gesteinswand gelegt (Abbildung 2.4) und 3 Parameter bestimmt, die die durchschnittliche Kluftspurlänge  $\mu_l$  auf einer Fläche infiniter Ausdehnung beschreiben:

- $N_0$ : Trennflächen, deren beiden Enden im Beprobungsfenster nicht einsehbar sind.
- $N_I$ : Trennflächen, die ein sichtbares und ein zensiertes Ende im Beprobungsfenster aufweisen.
- $N_2$ : Trennflächen, die komplett sichtbar sind innerhalb des Beprobungsfensters.
- $N_T$ : Die Summe aller Trennflächen  $N_0 + N_I + N_2$ .

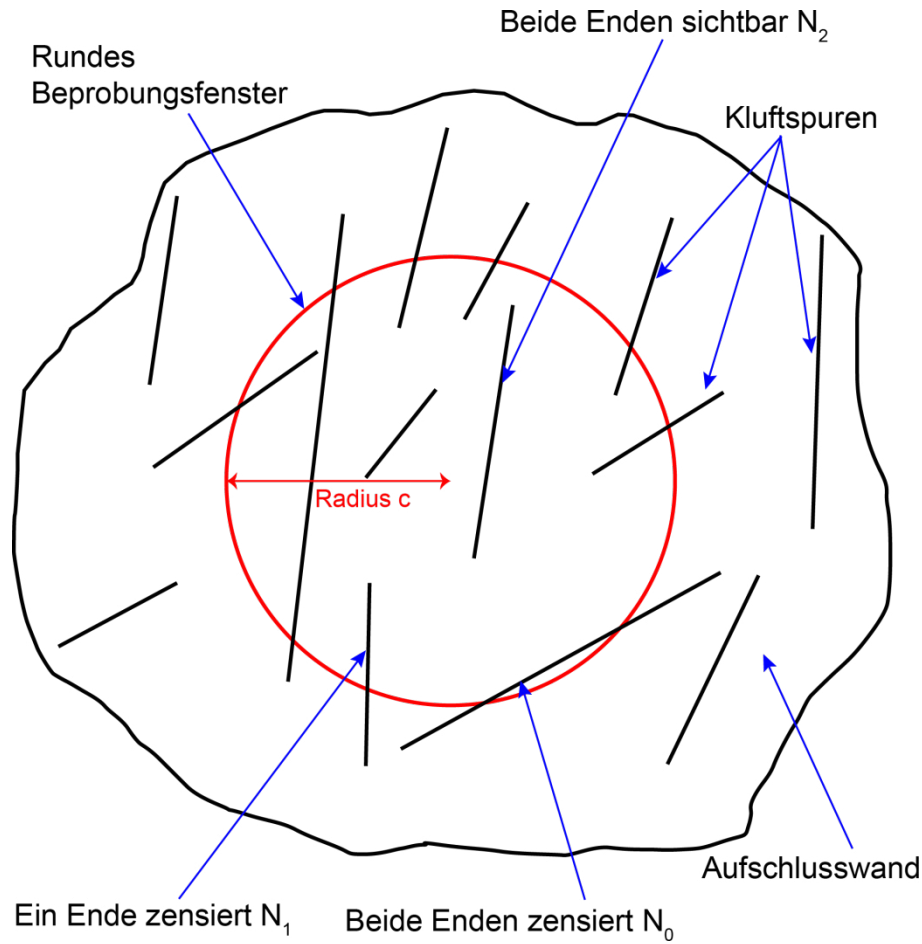


Abbildung 2.4 Schematische Darstellung eines runden Beprobungsfensters (roter Kreis) im Zuge des “Circular Window sampling“ (verändert nach Zhang und Einstein 1998) auf einer geklüfteten Felswand. Durch das Beprobungsfenster können  $N_0$ ,  $N_1$  und  $N_2$  bestimmt werden, also Trennflächen die komplett bzw. einseitig zensiert oder deren beiden Enden sichtbar im Fenster sind.

Aus diesen 3 Parametern, die im Gelände eingemessen werden können, berechnet sich die durchschnittliche Kluftspurlänge  $\mu_l$  auf einer infiniten Fläche:

$$\mu_l = \frac{\pi(N_T + N_0 - N_2)}{2(N_T - N_0 + N_2)}c \quad 2.7$$

Die Variable  $c$  steht hier für den Radius des runden Beprobungsfensters. Ergebnisse basierend auf dieser Formel 2.7 sind nicht von den Verzerrungen betroffen, die in Kapitel 2.5.10 beschrieben werden. Messungen der Kluftspurlängen sind dabei überflüssig und innerhalb der Formel für alle Werte von 0 bis Unendlich definiert (Zhang 2005).

In der Praxis können die exakten Werte für  $N_0$ ,  $N_1$ ,  $N_2$  und  $N_T$  nicht bestimmt werden, sie stellen die aus dem Trennflächenmuster zu erwartenden Ergebnisse bei Anwendung des „circular samplings“ dar und sind lediglich eine Stichprobe der wahren Werte von  $N_0$ ,  $N_1$ ,  $N_2$  und  $N_T$  und somit auch nur eine Annäherung an den wahren Wert für  $\mu_l$ . Die Stichproben werden durch  $\widehat{N}_T$ ,  $\widehat{N}_0$ ,  $\widehat{N}_1$  und  $\widehat{N}_2$  gekennzeichnet. Die durchschnittliche Länge der Kluftspuren  $\widehat{\mu}_l$  einer einzelnen Stichprobe ergibt sich somit als:

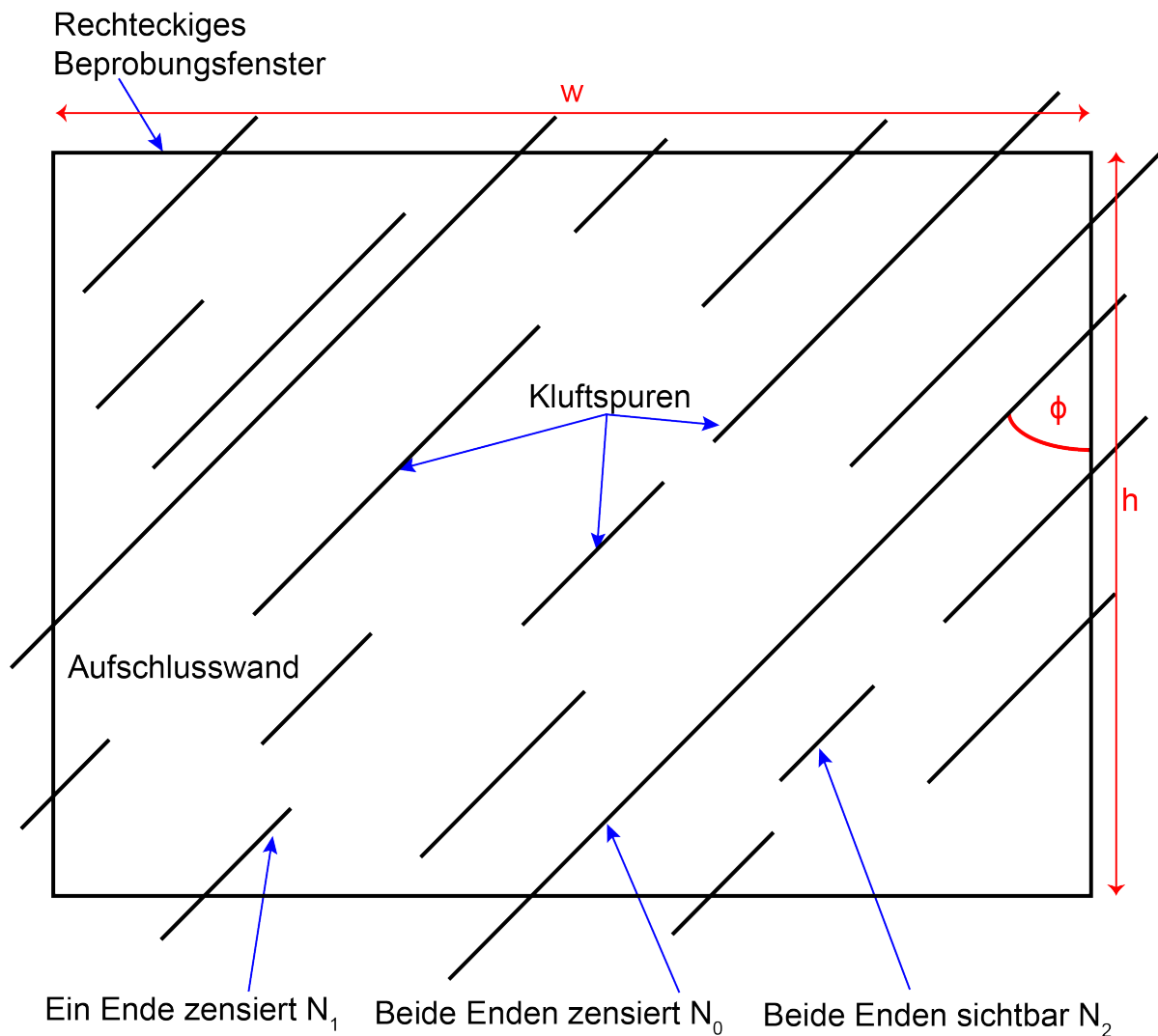
$$\widehat{\mu}_l = \frac{\pi(\widehat{N}_T + \widehat{N}_0 - \widehat{N}_2)}{2(\widehat{N}_T - \widehat{N}_0 + \widehat{N}_2)}c \quad 2.8$$

mit  $c$  als Radius des runden Beprobungsfensters (Abbildung 2.4).

Statt eines runden Beprobungsfensters, kann auch ein rechteckiges Fenster genutzt werden, dann gilt:

$$\hat{\mu}_l = \frac{w_b h_b (\hat{N}_T + \hat{N}_0 - \hat{N}_2)}{(w_b \cos \phi_b + h_b \sin \phi_b) (\hat{N}_T - \hat{N}_0 + \hat{N}_2)} \quad 2.9$$

Mit  $w_b$  als Breite und  $h_b$  als Höhe des gewählten Rechtecks, sowie  $\phi_b$  als Winkel zwischen der Vertikalen und der Orientierung der zu untersuchenden Trennflächen. Diese hier beschriebene Formel nach (Pahl 1981) setzt allerdings voraus, dass alle Trennflächen exakt parallel zueinander sind. Der Ansatz aus dem circular sampling gilt für jegliche Orientierung und ist somit als Methode zu präferieren.



**Abbildung 2.5** Schematische Darstellung eines rechteckigen Beprobungsfensters (schwarzes Rechteck) der Größe  $w$  (Breite  $w_b$ ) mal  $h$  (Höhe  $h_b$ ) auf einer geklüfteten Felswand (verändert nach Pahl 1981). Durch das Beprobungsfenster können  $N_0$ ,  $N_1$  und  $N_2$  bestimmt werden, das sind Parameter der Trennflächen, die komplett bzw. einseitig zensiert oder deren beiden Enden sichtbar im Fenster sind. Eine wichtige Voraussetzung dieser Methode ist die gleiche Orientierung der Kluftspuren im Gestein bei der Beprobung.

Eine Mittelung einer Mehrzahl an Messungen der Stichproben  $\hat{\mu}_l$  resultiert in einer Evaluation des intendierten Wertes von  $\mu_l$  (Zhang 2005). Unter der Bedingung  $\hat{N}_0 = \hat{N}_T$  gilt  $\hat{\mu}_l \rightarrow \infty$  und für  $\hat{N}_2 = \hat{N}_T$  wiederum  $\hat{\mu}_l = 0$ . Eine Korrektur kann hierbei über ein Vergrößern oder Verändern der Position des



Beprobungsrahmens erreicht werden oder durch die Verwendung einer Vielzahl von Beprobungsrahmen an verschiedenen Positionen der Aufschlusswand, um anschließend die Summe der Messungen zur Bestimmung von  $\hat{\mu}_l$  heranzuziehen (Zhang und Einstein 1998).

Die zwei Dichtefunktionen, die die Kluftspurlängen definieren, lauten:

- $g(l)$ : Dichtefunktion der Kluftspurlänge auf einer finiten Oberfläche, die Verzerrungen durch die Messmethode unterliegt.
- $f(l)$ : Dichtefunktion der Kluftspurlänge auf einer infiniten Oberfläche.

Ziel ist es aus der über Beprobung im Gelände bestimmten Verteilung  $g(l)$  die Funktion  $f(l)$  zu bestimmen. Eine Mittelung mehrerer gemessener  $\hat{\mu}_l$ -Werte der Funktion  $g(l)$  führt zu einer Abschätzung von  $\mu_l$  und wird als Mittelwert der Dichtefunktion  $f(l)$  genutzt. Der Variationskoeffizient  $COV$  der Funktion  $g(l)$  wird gleichermaßen für die Funktion  $f(l)$  herangezogen. Aus dem Variationskoeffizient  $COV$  kann mithilfe von  $\mu_l$  die Standardabweichung  $\sigma_l$  ermittelt werden:

$$\sigma_l = \mu_l (COV_l)_m \quad 2.10$$

mit  $(COV_l)_m$  als Variationskoeffizienten der gemessenen Kluftspurlängen, der sich aus dem Quotient der Standardabweichung und dem arithmetischen Mittelwert ergibt:

$$(COV_l)_m = \frac{\sigma_g}{\hat{\mu}_l} \quad 2.11$$

Mit  $\hat{\mu}_l$  als arithmetisches Mittel und  $\sigma_g$  als Standardabweichung der gemessenen Kluftspurlängen im Aufschluss. Schlussendlich wird für  $f(l)$  der gleiche, bereits bestimmte Verteilungstyp von  $g(l)$  angenommen.

### 2.5.6 Berechnung der kreisförmigen Kluftgröße

Aus den drei bekannten Parameters  $\sigma_l$ ,  $\mu_l$  und dem statistischen Verteilungstyp der Funktion  $f(l)$  werden nun die Parameter  $\sigma_D$ ,  $\mu_D$  der Funktion  $g(D)$  abgeschätzt, wobei für  $g(D)$  der gleiche Verteilungstyp wie für  $f(l)$  angenommen wird (Zhang und Einstein 2000). Die vollständigen Umrechnungen können der Tabelle 2.1 entnommen werden.

**Tabelle 2.1** Die Formeln zur Umrechnung der mittleren Kluftspurlänge  $\mu_l$  und deren Standardabweichung  $\sigma_l$  in einen zugehörigen mittleren Kreisradius der Kluft  $\mu_D$  (mit Standardabweichung  $\sigma_D$ ). Für drei Verteilungstypen sind die Formeln entsprechend angepasst (nach Zhang und Einstein 2000).

Verteilungstyp	$\mu_D$	$\sigma_D$
<b>Lognormal</b>	$\frac{128(\mu_l)^3}{3\pi^3[(\mu_l)^2 + (\sigma_l)^2]}$	$\frac{1536\pi^2[(\mu_l)^2 + (\sigma_l)^2](\mu_l)^4 - 128^2(\mu_l)^6}{9\pi^6[(\mu_l)^2 + (\sigma_l)^2]^2}$
<b>Negativ-Exponential</b>	$\frac{2}{\pi}\mu_l$	$\left[\frac{2}{\pi}\mu_l\right]^2$
<b>Gamma</b>	$\frac{64(\mu_l)^2 - 3\pi^2[(\mu_l)^2 + (\sigma_l)^2]}{8\pi\mu_l}$	$\frac{\{64(\mu_l)^2 - 3\pi^2[(\mu_l)^2 + (\sigma_l)^2]\}\{3\pi^2[(\mu_l)^2 + (\sigma_l)^2] - 32(\mu_l)^2\}}{64\pi^2(\mu_l)^2}$

### 2.5.7 Berechnung der elliptischen Kluftgröße

Die Berechnungen nach Tabelle 2.1 gelten für die Annahme, dass Trennflächen rund sind und die berechneten Parameter sich auf den Durchmesser „ $D_k$ “ der Kreise beziehen.

Für die Berechnung der längsten Achse  $a_e$  einer Ellipse als Äquivalent zur Größe einer Trennfläche gelten die mathematischen Beziehungen der Tabelle 2.2 (Zhang et al. 2002). Die Terme aus Tabelle 2.1 wurden dabei um einen Faktor  $M$  erweitert, der verschiedene mathematische Variablen der Ellipse beinhaltet. Der Faktor  $M$  wird dargestellt als,

$$M = \frac{\sqrt{\tan^2 \beta_e + 1}}{\sqrt{k_e^2 \tan^2 \beta_e + 1}} \quad 2.12$$

Der Faktor  $k_e$  ist das Verhältnis der beiden Hauptachsen der Ellipse  $a_e/k_e$  und  $\beta_e$  der Winkel zwischen der Hauptachse der Trennfläche und der Orientierung der Kluftspur.

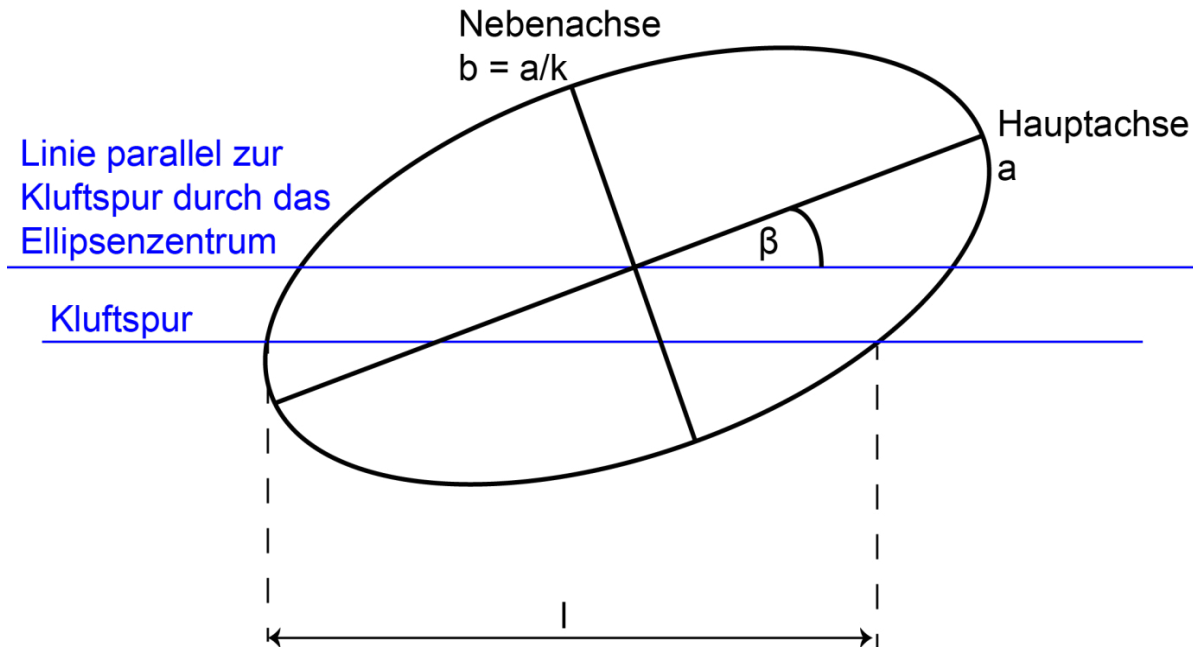


Abbildung 2.6 Schematische Darstellung der Beziehung zwischen sichtbaren Kluftspurlängen  $l$  und zugrundeliegender ellipsenförmiger Kluft (verändert nach Zhang 2005). Die Form ist definiert über die Hauptachsenlänge  $a$  ( $a_e$ ) und dem Achsenverhältnis  $k$  ( $k_e$ ). Der Winkel  $\beta$  ( $\beta_e$ ) bildet die Neigung der Hauptachse der Ellipse relativ zur Kluftspur ab.

Tabelle 2.2 Die Formeln zur Umrechnung der mittleren Kluftspurlänge  $\mu_l$  und deren Standardabweichung  $\sigma_l$  in eine zugehörige mittleren Hauptellipsenachsenlänge der Kluft  $\mu_a$  (mit Standardabweichung  $\sigma_a$ ). Für drei Verteilungstypen sind die Formeln entsprechend angepasst (nach Zhang et al. 2002).

Verteilungstyp	$\mu_a$	$\sigma_a$
Lognormal	$\frac{128(\mu_l)^3}{3\pi^3 M [(\mu_l)^2 + (\sigma_l)^2]}$	$\frac{1536\pi^2 [(\mu_l)^2 + (\sigma_l)^2] (\mu_l)^4 - 128^2 (\mu_l)^6}{9\pi^6 M^2 [(\mu_l)^2 + (\sigma_l)^2]^2}$
Negativ-Exponential	$\frac{2}{\pi M} \mu_l$	$\left[ \frac{2}{\pi M} \mu_l \right]^2$
Gamma	$\frac{64(\mu_l)^2 - 3\pi^2 [(\mu_l)^2 + (\sigma_l)^2]}{8\pi M \mu_l}$	$\frac{\{64(\mu_l)^2 - 3\pi^2 [(\mu_l)^2 + (\sigma_l)^2]\} \{3\pi^2 [(\mu_l)^2 + (\sigma_l)^2] - 32(\mu_l)^2\}}{64\pi^2 M^2 (\mu_l)^2}$

Die Ergebnisse reagieren sehr sensitiv auf den Wert des Winkels  $\beta_e$ , darum empfiehlt es sich mehrere Beprobungsfenster zu wählen, die unterschiedliche Winkel  $\beta_e$  für ein entsprechendes Trennflächenet ergeben. Der Winkel  $\beta_e$  soll möglichst je einmal zwischen 0 und 20° und 60-120° liegen (Zhang 2005).

Die Ermittlung der Hauptachsenorientierung der Ellipse und dem passenden Achsenverhältnis  $k_e$  erfordert folgende Arbeitsschritte (Zhang 2005):

1. Beprobung: Orientierung und Längen der Kluftspuren mithilfe von zwei oder mehr Beprobungsfenstern an verschiedenen Stellen bestimmen, um die Funktion  $g(l)$  abzuleiten. Die Fenster so wählen, dass unterschiedliche Resultate an wechselnden Positionen ermittelt werden.
2. Aus  $g(l)$  die Funktion  $f(l)$ , inklusive  $\mu_l$  und  $\sigma_l$ , berechnen.
3. Die Funktion  $g(a)$ , Hauptachsenorientierung und Achsenverhältnis  $k_e$  bestimmen:

- a. Einen zufälligen Wert für die Hauptachsenorientierung annehmen, um einen vorläufigen Wert des Winkels  $\beta_e$  zu berechnen.
- b. Über den angenommenen Winkel  $\beta_e$  werden aus  $\mu_l$  und  $\sigma_l$  die entsprechenden Werte  $\mu_a$  und  $\sigma_a$  für jedes Beprobungsfenster berechnet. Insgesamt werden fünf verschiedene Achsenverhältnisse ( $k_e = 1, 2, 4, 6, 8$ ) bei der Berechnung gewählt und 3 verschiedene Verteilungsfunktionen für  $g(a)$  angenommen (Lognormal, Negativ-exponentiell und Gamma). Die berechneten Werte von  $\mu_a$  werden gegen  $k_e$  für alle 3 Verteilungsfunktionen von  $g(a)$  auf ein Diagramm aufgetragen.
- c. Die Schritte a und b werden wiederholt bis sich die im Diagramm dargestellten Kurven verschiedener Beprobungsfenster in einem Punkt schneiden. Der an diesem Punkt ermittelte Wert des Winkels entspricht der Orientierung der Hauptachsenorientierung und die Werte für  $k_e$ ,  $\mu_a$  und  $\sigma_a$  können an dieser Stelle abgelesen werden (vgl. Abbildung 5.27).
4. Für die angenommene Verteilungsfunktion von  $g(a)$  wird die Gleichheit der Formel 2.18 geprüft. Die optimale Funktion ergibt sich für eine größtmögliche Gleichheit beider Seiten der Formel. Zu der so ermittelten optimalen Funktion werden aus den unter c) erstellen Diagrammen die korrespondierenden Werte für  $k_e$ ,  $\mu_a$  und  $\sigma_a$  abgelesen.

### 2.5.8 Überprüfung der Ergebnisse

Die Resultate für  $\mu_D$  und  $\sigma_D$  beziehungsweise  $\mu_a$  und  $\sigma_a$  hängen direkt vom gewählten Verteilungstyp ab (Lognormal, Negativ-Exponential oder Gamma). Die Ergebnisse unterschiedlich gewählter Verteilungen können jeweils auf ihre Eignung über das Verhältnis des 4ten ( $E(d^4)$ ) und 1sten Moments ( $E(d)$ ) der Durchmesser (bzw. längsten Achsen der Ellipsen) und dem 1sten ( $E(l)$ ) und 3ten Moment ( $E(l^3)$ ) der Kluftspurlängen überprüft werden.

Bei Trennflächen, deren Form durch Kreise beschrieben wird, gilt (Zhang und Einstein 2000):

$$\frac{E(d^4)}{E(d)} = \frac{4E(l^3)}{3E(l)} \quad 2.13$$

Das erste Moment der Kluftspurlängen  $E(l)$  entspricht dem arithmetischen Mittel  $\mu_l$  der Messungen, das dritte Moment berechnet sich über:

$$E(l^3) = \mu_l^3 + 3\mu_l\sigma_l^2 \quad 2.14$$

Hier ist  $\sigma_l$  die Standardabweichung der Kluftspurlängen. Für die 3 angenommenen Verteilungstypen bei kreisrunden Trennflächen kann die Formel 2.13 umgeschrieben werden:

$$\text{Lognormal:} \quad \frac{[(\mu_D)^2 + (\sigma_D)^2]^5}{(\mu_D)^8} = \frac{4E(l^3)}{3E(l)} \quad 2.15$$

$$\text{Negativ-Exponential:} \quad \frac{[(\mu_D)^2 + (\sigma_D)^2]^5}{(\mu_D)^8} = \frac{4E(l^3)}{3E(l)} \quad 2.16$$

$$\text{Gamma:} \quad \frac{[(\mu_D)^2 + (\sigma_D)^2]^5}{(\mu_D)^8} = \frac{4E(l^3)}{3E(l)} \quad 2.17$$

Der gesamte Arbeitsprozess lässt sich wie folgt zusammenfassen (nach Zhang und Einstein 2000):

1. Den Verteilungstyp, sowie  $\mu_l$  und  $\sigma_l$  der Funktion  $f(l)$  und anschließend  $E(l)$  und  $E(l^3)$  bestimmen.
2. Eine Verteilungsfunktion für  $g(D)$  annehmen (entspricht oft dem Typ von  $f(l)$ ) und die Werte für  $\mu_D$  und  $\sigma_D$  nach Tabelle 2.2 berechnen.

3. Für die angenommene Verteilungsfunktion von  $g(D)$  wird die Gleichheit der Formel 2.13 geprüft. Die optimale Funktion ergibt sich für eine größtmögliche Gleichheit beider Seiten dieser Formel.

Analog wird für Ellipsen die Formel 2.13 nach Zhang (Zhang et al. 2002) umformuliert:

$$\frac{E(a^4)}{E(a)} = \frac{16E(l^3)}{3\pi M^3} \quad 2.18$$

Für elliptische Trennflächen gilt dann nach Zhang (Zhang et al. 2002):

$$\text{Lognormal:} \quad \frac{[(\mu_a)^2 + (\sigma_a)^2]^6}{(\mu_a)^9} = \frac{16E(l^3)}{3\pi M^3} \quad 2.19$$

$$\text{Negativ-Exponential:} \quad 24(\mu_a)^2 = \frac{16E(l^3)}{3\pi M^3} \quad 2.20$$

$$\text{Gamma:} \quad \frac{[(\mu_a)^2 + 2(\sigma_a)^2][(\mu_a)^2 + 2(\sigma_a)^2][(\mu_a)^2 + 3(\sigma_a)^2]}{(\mu_a)^3} = \frac{16E(l^3)}{3\pi M^3} \quad 2.21$$

### 2.5.9 Berechnung der rechteckigen Kluftgröße

Zur Charakterisierung rechteckig geformter Trennflächen bzw. Klüfte werden kurz 3 Methoden angerissen (Zhang und Einstein 2010).

- Über geometrische Beziehungen kann die Größe von Rechtecken in geschichteten Gesteinen ermittelt werden. Da in Sedimentgesteinen die Trennflächen oft durch Schichtung begrenzt ist, kann über Messung der Kluftspurlänge an der Stirnseite die Größe bzw. Geometrie einer als rechteckig angenommenen Kluft bzw. Trennfläche abgeschätzt werden (siehe auch Petit et al. 1994).
- Stereologische Beziehungen zwischen der Kluftlängenverteilung  $f(l)$  und Kluftgrößen  $g(D)$  für rechteckige, statt runde oder elliptische, Klüfte werden in diesem Ansatz genutzt (Warburton 1980b). Die weiteren Arbeitsschritte folgen hingegen dem bereits vorgestellten Ablauf für elliptische bzw. runde Klüfte zur Bestimmung der Form und Größe.
- Rechteckige Trennflächen werden zunächst als Ellipsen angenommen und alle Arbeitsschritte nach (Zhang et al. 2002) durchgeführt. Die ermittelten Ellipsengrößen werden zur Darstellung von Rechtecken repräsentativ verwandt. Bei gleicher Flächengröße ergibt sich die Höhe und Breite des Rechtecks aus 87% der Längen der beiden Ellipsenachsen. Die durch die Ellipse eingenommene Oberfläche auf dem Rechteck beträgt mindestens 91%. Ein Verhältnis über 91% tritt beispielsweise bei durch Schichtung begrenzten Klüften auf, deren Enden elliptisch ausgebildet sind. Da Ellipsen stets mindestens 90% der Fläche eines Rechtecks einnehmen, ist es ausreichend, rechteckige Klüfte über Ellipsen anzunähern (Zhang und Einstein 2010). Zusammenfassend gilt für ein Rechteck mit der Höhe  $H_R$ , Breite  $B_R$  und einer Ellipse gleicher Fläche mit der Hauptachse  $a_e$  und Nebenachse  $b_e$  (Abbildung 2.7):

$$B_R = 0,87 * a_e \quad 2.22$$

$$H_R = 0,87 * b_e \quad 2.23$$

$$\frac{\text{Von Ellipse eingenommene Fläche auf Rechteck}}{\text{Gesamtfläche Rechteck}} = 0,91 \quad 2.24$$

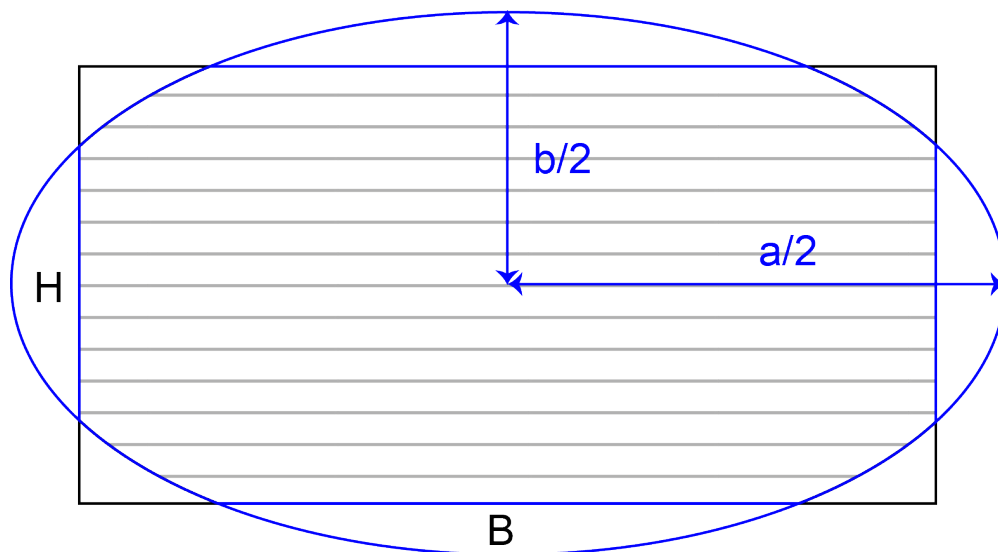


Abbildung 2.7 Darstellung einer Trennfläche wahlweise als Ellipse, mit Hauptachse  $a$  ( $a_c$ ) und Nebenachse  $b$  ( $b_c$ ), oder Rechteck mit den Kantenlängen  $B$  ( $B_R$ ) und  $H$  ( $H_R$ ). Beide Formen weisen den gleichen Flächeninhalt und den Mittelpunkt auf. Die quergestreifte Fläche ist die parallel von Rechteck und Ellipse eingenommene Oberfläche (verändert nach Zhang und Einstein 2010).

Die dritte aufgeführte Methode ist die in dieser Dissertation verwendete, da sie direkt aus den zuvor berechneten Ellipsendaten über einfache mathematische Zusammenhänge berechnet werden kann.

### 2.5.10 Verzerrung bei Messung der Kluftgrößen

Die Ergebnisse der Messungen von Kluftspuren im Gestein hängen von verschiedenen Faktoren ab. Folgende Punkte sind dabei zu beachten (z.B. Zhang und Einstein 1998, Zhang und Einstein 2000, Mauldon 1998, Kulatilake, P. H. S. W. und Wu 1984, Hudson und Harrison 1997, Zhang 2005):

- Orientierungsverzerrung (engl. „orientation bias“): Die Wahrscheinlichkeit eine Trennflächenspur (Verschneidung einer Trennfläche mit der Aufschlusswand) anzutreffen ist abhängig von der Orientierung der Trennfläche und der Orientierung der Aufschlusswand.
- Die Orientierung der Scanline relativ zum jeweils gemessenen Trennflächenet beeinflusst (wie Punkt a) die Wahrscheinlichkeit eine Trennflächenspur zu erfassen.
- Größenverzerrung (engl. „size bias“): Die Wahrscheinlichkeit große Klüfte zu beproben ist höher als die für kleine. Dies hängt auch von der angewandten Methode ab und spielt eine große Rolle beim Anwenden einer Scanline. Lange Kluftspuren werden wahrscheinlicher innerhalb eines Beprobungsfensters angetroffen und große Trennflächen sind mit höherer Wahrscheinlichkeit im Felsgestein aufgeschlossen.
- Längen unterhalb eines Schwellenwertes werden unter Umständen nicht mehr erfasst, beispielsweise wenn die Länge der Trennfläche unterhalb der Auflösung der Aufnahmemethode liegt. Bei Messungen mit einem Zollstock wäre dies im Millimeterbereich der Fall. Dieses Phänomen wird als „Abschneiden von Zahlen unter einem Schwellenwert“ oder „Stutzen der Verteilung“, englisch „Truncation“, bezeichnet.
- Zensur (engl. „censorship“) führt zur Nichtberücksichtigung von Trennflächen oberhalb einer bestimmten Größe, entweder durch Limitierung der Messmöglichkeiten im Bereich der Ausrüstung vor Ort oder dadurch, dass große Trennflächen nicht komplett aufgeschlossen sind im Felsgestein oder an anderen Trennflächen terminieren.

Der Punkt b spielt nur bei der Verwendung der Scanlinemethode eine Rolle, während die weiteren Punkte unabhängig der angewandten Methode Einfluss auf das Ergebnis haben. Sie müssen bei der Kalkulation der Kluftlängenverteilung  $f(l)$  aus den gemessenen Werten  $g(l)$  berücksichtigt werden (siehe auch Kapitel 2.5.5). „Truncation“ kann vorgebeugt werden, wenn die Korrektur nach

(Warburton 1980) genutzt wird oder Kluftspurlängen bis ca. 1 cm erfasst werden, wenn gleichzeitig der Mittelwert der Werte im Meterbereich liegt (Priest und Hudson 1981).

In der Literatur ist meist nur von Verzerrungen bei der Aufnahme von Kluftspuren als Indikator der Kluftgröße die Rede. Die aufgelisteten, möglichen Verzerrungsquellen lassen sich aber auch auf die aufgeschlossenen Kluftflächen, statt ihrer Spuren, analog übertragen. Allgemein werden Verzerrungen der Trennflächenaufnahme mit und ohne TLS in den Kapiteln 7.2 und 7.3 beschrieben.

## 2.6 Abstand

Der **Abstand von Trennflächen** wird als mittlerer oder modaler Abstand zwischen Trennflächen einer Schar zueinander oder über die Angabe einer beschreibenden Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Abstände bestimmt. Nach der DIN 14689-1 (Deutsches Institut für Normung 2011) werden für die Klassifikation von Schichtung und Klüften bzw. Schieferungsflächen unterschiedliche Notationen verwendet (Tabelle 2.3).

Tabelle 2.3 Bezeichnung zur Beschreibung der Abstände von Schichtflächen und Kluft-/Schieferungsflächen nach DIN 14689-1 (Deutsches Institut für Normung 2011).

Typ	Bezeichnung	Abstand [mm]
Schichtflächen	sehr dick	größer als 2000
	dick	2000 bis 600
	mittel	600 bis 200
	dünn	200 bis 60
	sehr dünn	60 bis 20
	grob laminiert	20 bis 6
	fein laminiert	kleiner als 6
Kluft- und Schieferungsflächen	sehr weitständig	größer als 2000
	weitständig	2000 bis 600
	mittelständig	600 bis 200
	engständig	200 bis 60
	sehr engständig	60 bis 20
	außerordentlich engständig	kleiner als 20

## 2.7 Intensität

Die **Häufigkeit** oder **Anzahl** der Trennflächen in Relation zu einer Referenzgröße wird durch die Intensität ausgedrückt. Oftmals fällt darunter auch die **Trennflächendichte** (Abbildung 2.8). Die genauen Termini sind in den folgenden Unterkapiteln erläutert.


### 2.7.1 Quantifizierung des Ausmaßes des Trennflächengefüges


Um den Grad der Klüftung (Klüftigkeit) bzw. die Häufigkeit von Trennflächen in einem Gestein zu beschreiben, lassen sich in den Geowissenschaften verschiedene Begriffe und Definitionen ausmachen. Zu den häufigsten Begriffen zählen die Intensität oder die Dichte der Klüftung. Im Folgenden werden die wichtigsten Termini aufgeführt und kurz erläutert (nach Mauldon und Dershowitz 2000):


- Trennflächenabstand (Fracture spacing)
- Trennflächendichte (Fracture density)
- Trennflächenintensität (Fracture intensity)
- Trennflächenporosität (Fracture porosity)
- Trennflächenhäufigkeit (Fracture frequency)
- Trennflächenpersistenz (Fracture persistence)
- Dimensionslose Trennflächendichte (Dimensionless fracture density)
- Grad der Entwicklung der Trennflächen (degree of development)

Auf den ersten Blick sind die meisten der Begriffe qualitativ oder mehrdeutig. Eine Dichte, Intensität oder Porosität kann sowohl ein-, zwei- als auch dreidimensional bestimmt werden. Die Abbildung 2.8 soll Klarheit schaffen (nach Mauldon und Dershowitz 2000) und definiert die Begrifflichkeiten für diese Doktorarbeit.

		Dimension der untersuchten Struktur				
		0	1	2	3	
Dimension der Untersuchungsregion	0	$P_{00} L^0$ Anzahl Trennflächen pro Untersuchungspunkt im Gestein				Punktmessungen
	1	$P_{10} L^{-1}$ Anzahl Trennflächen pro Einheitslänge der Scanline (Häufigkeit oder Lineare Intensität)	$P_{11} L^0$ Länge d. Trennflächenteilstücke pro Einheitslänge der Scanline (Lineare Porosität)			Lineare Messungen
	2	$P_{20} L^{-2}$ Anzahl der Trennflächenspurzentren pro Beprobungsfläche (Flächen- oder Kluftspurdichte)	$P_{21} L^{-1}$ Länge der Trennflächenspuren pro Beprobungsfläche (Flächen- oder Kluftspurintensität)	$P_{22} L^0$ Fläche der Trennflächen pro Beprobungsfläche (Flächenporosität)		Flächenmessungen
	3	$P_{30} L^{-3}$ Anzahl der Trennflächenzentren pro Gesteinsvolumen (Volumendichte)	$P_{31} L^{-1}$	$P_{32} L^{-1}$ Fläche der Trennflächen pro Volumen der Gesteinsmasse (Volumenintensität)	$P_{33} L^0$ Volumen der Trennflächen pro Volumen der Gesteinsmasse (Trennflächenporosität)	Volumenmessungen

  
Dichte

  
Intensität

  
Porosität

**Abbildung 2.8 Terminologie der Gesteinsklassifizierung in Hinblick auf Dichte, Intensität und Porosität von Trennflächen.** Ein typischer und oft in Geländekampagnen gewonnener Wert, um die Anzahl von Trennflächen zu bestimmen, ist der Intensitäts- und Dichtewert  $P_{10}$  (verändert nach Dershowitz und Herda und Mauldon und Dershowitz 2000).

Die Dichte (fracture density) ist definiert als die Anzahl von Trennflächen innerhalb einer vorgegebenen Dimensionen (pro Länge einer Scanline [ $L^{-1}$ ], Fläche [ $L^{-2}$ ] oder Volumen [ $L^{-3}$ ]).

Die Intensität (fracture intensity) erfasst die Häufigkeit der Klüftung für alle 3 Dimensionen in der gleichen Einheit [ $L^{-1}$ ]. Die Porosität im Gestein durch das Trennflächengefüge ist ein dimensionsloser Wert. Bezugssystem und untersuchtes Merkmal sind dimensionsgleich.

Die Trennflächenhäufigkeit wird über die  $P_{XY}$  Nomenklatur ausgedrückt. Das X repräsentiert die Dimension des untersuchten Bereichs (*sampling domain*) und Y die Dimension des gemessenen Merkmals (*measured feature*) (Gauthier und Bertotti 2012).

Allgemein gelten die folgenden Zusammenhänge bei der Berechnung der wichtigsten Parameter zur Bestimmung der Klüftung.

- Berechnungen zur Dichte des Trennflächengefüges

$$P_{10} = \frac{\text{Anzahl Klüfte } [n]}{\text{Länge der Scanline } [L]} \quad 2.25$$

$$P_{20} = \frac{\text{Anzahl Klüfte } [n]}{\text{Aufgeschlossene Fläche } [A]} \quad 2.26$$

$$P_{30} = \frac{\text{Anzahl Klüfte } [n]}{\text{Volumen des Felsgesteins } [V]} \quad 2.27$$

- Berechnungen zur Intensität des Trennflächengefüges

$$P_{10} = \frac{\text{Anzahl Klüfte } [n]}{\text{Länge der Scanline } [L]} \quad 2.28$$

$$P_{21} = \frac{\text{Länge der Kluftspuren } [k]}{\text{Aufgeschlossene Fläche } [A]} \quad 2.29$$

$$P_{32} = \frac{\text{Fläche der Käfte } [f]}{\text{Volumen des Felsgesteins } [V]} \quad 2.30$$

Alle ein- und zweidimensionalen Berechnungsgrößen sind richtungsabhängig. Zur Erhöhung der Signifikanz des Ergebnisses empfiehlt sich eine mehrfache Quantifizierung mit unterschiedlicher Ausrichtung.

Es existieren eine Vielzahl an Parametern, um die Anzahl von Trennflächen oder den Grad der Klüftigkeit innerhalb eines Felsgesteins zu quantifizieren (Abbildung 2.8). Die Werte für  $P_{10}$ ,  $P_{20}$  und  $P_{21}$  sind direkt im Gelände an der Gesteinswand quantifizierbar. Für den Wert  $P_{10}$ , der sowohl der eindimensionalen Definition der Dichte als auch der Intensität entspricht, benutzt man die Scanline Methode. Entlang einer eindimensional gezogenen Linie (beispielsweise mit einem Maßband) werden die Abstände der Schnittpunkte dieser Linie mit den jeweiligen Trennflächen bestimmt. Diese Methode kann auch an Bohrkernen angewendet werden, indem man die Anzahl der Trennflächen entlang einer Seite des Kerns abzählt. Der Wert  $P_{20}$  ist das Ergebnis einer gewählten Fläche an einer Gesteinswand und dem genauen Abzählen der Trennflächen innerhalb dieser Fläche. Der Intensitätsparameter  $P_{21}$  ist zum einen bestimmbar durch das Abmessen der Trennflächenlängen innerhalb einer vorgegebenen Fläche, „Window mapping“ genannt, zum anderen über das sogenannte „Circular Scanline mapping“. Zusätzlich zu diesen 3 Parametern können noch die  $P_{00}$  und  $P_{11}$  Werte direkt im Gelände über bewährte Methoden ermittelt werden. Der für eine DFN Modellierung unerlässliche Wert  $P_{32}$ , der als Eingabeparameter bei der Bestimmung der Klüftigkeit dient, kann nur mathematisch aus  $P_{10}$  und  $P_{21}$  berechnet werden (siehe Kapitel 5.3.2).

Werte für  $P_{32}$  sind nicht im Gelände ermittelbar. Mithilfe von Umwandlungsfaktoren ist es möglich, die  $P_{32}$  aus den  $P_{21}$ - oder  $P_{10}$ -Werten zu bestimmen. Die zu nutzenden mathematischen Umrechnungen sind in Tabelle 2.4 dargestellt (Mauldon und Dershowitz 2000).

Tabelle 2.4 Mögliche Umrechnungen ein- und zweidimensionaler Parameter in den dreidimensionalen Intensitätsparameter  $P_{32}$ .

Konvertierung von	Parallele Trennflächen	Einheitliche Verteilung der Trennflächenorientierungen	Spezifische Verteilung der Trennflächenorientierungen
1D zu 3D	$P_{32} = \csc(\theta) * P_{10}$	$P_{32} = 2 * P_{10}$	$P_{32} = C_{31} * P_{10}$
2D zu 3D		$P_{32} = (\frac{4}{\pi}) * P_{21}$	$P_{32} = C_{32} * P_{21}$



Für den Fall absolut paralleler Trennflächen kann der  $P_{32}$  Wert über den Winkel  $\varepsilon$  zwischen Scanline und Trennflächennormale und dem eindimensionalen Intensitätsparameter  $P_{10}$  bestimmt werden (Abbildung 2.2). Eine einheitliche Verteilung der Trennflächenorientierungen setzt voraus, dass die Fisher-Konstante (bzw. der Fisher-Konzentrationsparameter)  $\kappa$  annähernd den Wert 1 annimmt. Für Fälle von  $\kappa \gg 1$  ist die Annäherung ungültig (siehe Kapitel 2.3.1).

### 2.7.2 Scanline-Methode

Die im Gelände durchgeführte Scanline-Methode ist ein schnelles Verfahren zur Aufnahme verschiedener Kluftparameter. Die Raumlage, Größe und der Abstand der Klüfte kann über eine horizontale Linie entlang einer Aufschlusswand bestimmt werden (Priest und Hudson 1981, Priest 1993). Bestimmt wird hierbei der Abstand zwischen den Schnittpunkt der Scanline mit der aufgeschlossenen Kluftfläche oder Kluftspur einer zusammengehörigen Kluftschar. Das Reziproke des durchschnittlichen Kluftabstandes resultiert im Intensitätsparameter  $P_{10}$ . Wichtig hierbei ist eine Korrektur nach der Methode von Terzaghi, um die scheinbaren (gemessenen) Abstände zunächst in einen wahren Kluftabstand zu überführen (Terzaghi 1965). Gemäß Gauthier und Bertotti (Gauthier und Bertotti 2012) ist die Korrektur nach Terzaghi möglicherweise fehlerhaft, wenn der Winkel zwischen Scanline und Einfallsrichtung der Trennfläche weniger als  $30^\circ$  beträgt (Abbildung 2.2).

### 2.7.3 Areal Mapping Methoden

Statt eindimensionaler Scanlines kann auch auf Flächen eine Dichte oder ein Intensitätswert der Klüftung bestimmt werden. So kann der  $P_{20}$  Wert über die Anzahl der Klüfte in der Fläche oder  $P_{21}$  über die Länge der Kluftspuren in der Fläche bestimmt werden (Singhal und Gupta 2010, Mauldon und Dershowitz 2000).

Mauldon (Mauldon et al. 1999) entwickelte zudem eine Methode, um  $P_{21}$  auf einer Fläche aus den Schnittpunkten einer kreisrunden Scanline mit Klüften zu berechnen über den Ansatz:

$$P_{21} = \frac{N_S}{4r_S} \quad 2.31$$

Mit  $N$  als Gesamtzahl der Schnittpunkte und  $r_S$  als Radius des Kreises.

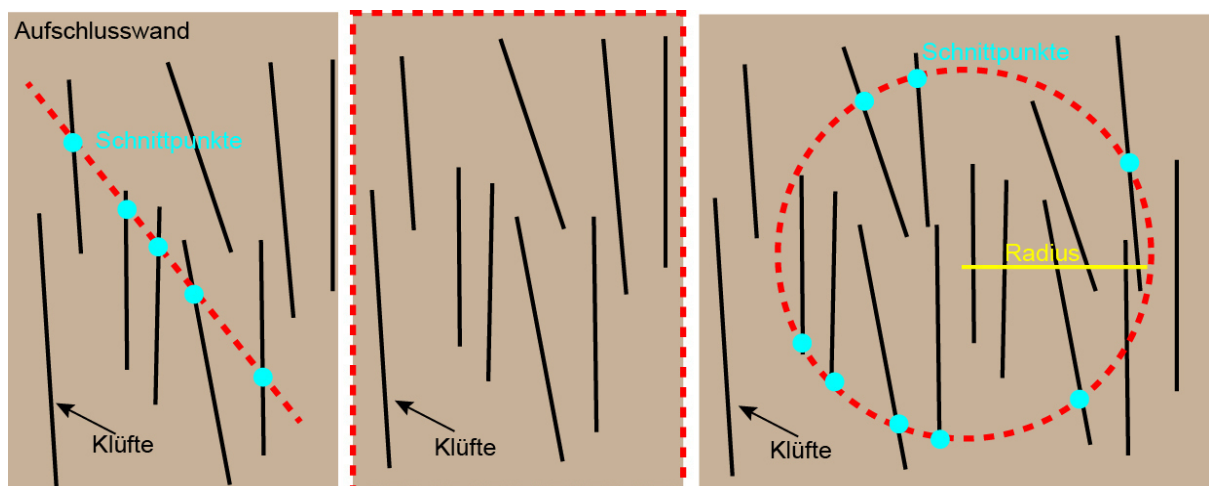


Abbildung 2.9 Graphische Darstellung der Aufnahmefunktionen im Gelände an einer Aufschlusswand. Links ist die Scanline-Methode (rote, gestrichelte Linie) illustriert. Dort ergeben sich 5 Schnittpunkte, zwischen denen die Abstände gemessen werden und aus denen sich schlussendlich der  $P_{10}$  Wert bestimmen lässt. Die Mitte zeigt ein Window Mapping (rote, gestrichelte Umrandung) aus dem über die Anzahl und Länge der Klüfte innerhalb des Fensters  $P_{20}$  und  $P_{21}$  bestimmt werden können. Rechts ist ein Circular Scanline Sampling dargestellt, bei dem über den Radius einer kreisförmigen Scanline und der Anzahl der Schnittpunkte  $P_{21}$  bestimmt wird (nach Mauldon und Dershowitz 2000 und Zhang 2005).

## 2.8 Matrixblockgröße

Die aus dem Trennflächennetzwerk resultierende Größe der Matrixgesteinsblöcke, die sich aus dem Trennflächenabstand in 3 Raumrichtungen ergibt und wie in Abbildung 2.11 dargestellt klassifizieren lässt, wird als Matrixblockgröße bezeichnet (Deutsches Institut für Normung 2011). Sie definiert sich aus Durchschnittsabständen. Zusätzlich kann auch eine Verteilung von Blockgrößen als Volumen angegeben werden.



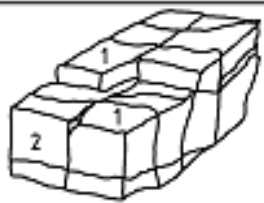


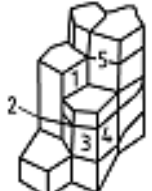
Bezeichnung	Bild	Beschreibung
a) vielfächiger Gesteinskörper		ungleichförmige Trennflächenschar, geringer Durchtrennungsgrad
b) tafelförmiger Gesteinskörper		eine vorherrschende, parallel verlaufende Trennflächenschar (1) mit nicht durchgehenden Klüften; Dicke viel geringer als Länge oder Breite
c) prismatischer Gesteinskörper		zwei vorherrschende Trennflächenscharen (1 und 2) mit einer dritten unregelmäßigen Trennflächenschar; Dicke viel geringer als Länge oder Breite
d) gleichmäßiger Gesteinskörper		drei vorherrschende Trennflächenscharen, die ungefähr senkrecht zueinander verlaufen (1, 2 und 3), mit teilweise unregelmäßigen Trennflächen
e) rhombischer Gesteinskörper		drei (oder mehr) vorherrschende gegen einander geneigte Trennflächenscharen (1, 2 und 3)
f) säulenförmiger Gesteinskörper		mehrere, gewöhnlich mehr als drei, durchsetzende parallele Trennflächenscharen (1, 2, 3, 4, 5), die oft von unregelmäßigen Trennflächen geschnitten werden; Länge viel größer als Breite und Dicke

Abbildung 2.10 „Bezeichnungen zur Beschreibung von Gesteinskörpern“ nach DIN 14689-1 (Deutsches Institut für Normung 2011).

Bezeichnung	Durchschnittsabmessungen mm
sehr groß	größer als 2 000
groß	600 bis 2 000
mittel	200 bis 600
klein	60 bis 200
sehr klein	kleiner als 60

Abbildung 2.11 „Abmessungen der Gesteinskörper“ nach DIN 14689-1 (Deutsches Institut für Normung 2011).

### 2.8.1 Durchschnittliche Blockgröße und Rohblockhöflichkeit

Die Ermittlung der Blockgröße in einem geklüfteten Gesteinskörper spielt eine tragende Rolle bei unterschiedlichen Anwendungen. Zum einen lässt sich aus der durchschnittlichen Blockgröße die Anzahl an Rohblöcken in einem Steinbruch ermitteln. Sie ist Bestandteil der Erkundung der Lagerstätte bei der Vorrats- und Abraumermittlung (Singewald 1992). Eine geringe Fragmentierung und somit hohe Blockgröße führt zu erhöhtem Aufwand bei der Gewinnung von Natursteinen. Davon abhängig ist die Wahl des richtigen Equipments bei der Gewinnung und des Bedarfs an Energie für das Zerstoßen und Zerkleinern von Natursteinen (2013).

Zum anderen spielt die Blockgröße auch bei der Gewinnung von Kohlenwasserstoffen aus geklüfteten Reservoirs eine wichtige Rolle. Die Blockgröße ist ein kritischer Faktor bei der Bestimmung des Fluidflusses zwischen Gesteinsmatrix und Kluftsystem (2013, Golder Associates 1999-2015).

#### **Vorratsermittlung**

Zur Ermittlung des Vorrats an gewinnbaren Massenrohstoffen aus beispielsweise Steinbrüchen wird eine Faustformel angewandt, die die gesamte Lagerstättenfläche, die Mächtigkeit der Schichten des zu gewinnenden Rohstoffs und die Abbauverluste berücksichtigt. Die Formel hierzu lautet (Singewald 1992):

$$\text{Vorrat} = \text{Lagerstättenfläche} * \text{Mächtigkeit} - \text{Abbauverluste} \quad 2.32$$

Diese lässt sich nicht auf die Gewinnung von Natursteinen übertragen, sondern findet auch Anwendung bei der Bestimmung der gesamten Gewinnung an Schotter oder ähnlichem. Natursteine werden in ganzen Gesteinsblöcken gewonnen, sogenannten Rohblöcken. Die Anzahl ausreichend großer Rohblöcke entspricht dem maximal möglichen, gewinnbaren Vorrat einer Lagerstätte bzw. eines Steinbruchs. Diese Anzahl an Rohblöcken wird Rohblockhöflichkeit genannt. Die Größe der abbaubaren Blöcke ist natürlich durch das Trennflächengefüge vorgegeben. Nach (Singewald 1992) gibt es für den Abbau von Natursteinen ein Mindestrohblockvolumen bzw. eine Mindestblockgröße, die die abgebauten Blöcke nicht unterschreiten darf. Andernfalls ist der Abbau bzw. die Weiterverarbeitung unwirtschaftlich und technisch anspruchsvoll.

#### **Bestimmung Blockgröße/Volumen einer Rutschung**

Unter Blockgröße, also die Größe eines untersuchten Gesteinsblocks, wird stets das Volumen eines Gesteinskörpers begrenzt von Trennflächen verstanden. Diese Annahmen beruhen auf der Verschneidung verschiedener Trennflächenscharen. Die Flächen dieser Scharen bilden einen dreidimensionalen Körper, dessen Volumen berechnet werden kann. Es werden nur Trennflächenscharen dreier Orientierungen berücksichtigt, die gemeinsam den Bereich des zu bestimmenden Volumens umschließen. Je zwei Flächen jeder Schar spannen das Volumen auf. Benötigt werden hierzu lediglich die Abstände zwischen den Trennflächenscharen, ihre Orientierung zueinander und der daraus resultierende Winkel zwischen den Scharen sowie die Persistenz der

Trennflächen. Dies trifft allerdings nur unter der Annahme konstanter Trennflächenabstände zu, was durch exakt parallel orientierte Trennflächen gegeben ist. In der Natur variieren die Abstände in einem gewissen Rahmen, daher sind auch die Blockgrößen variabel.

Um beispielsweise das Volumen einer Hangrutschung bzw. eines Steinschlags nach dessen Eintritt zu ermitteln, können einzelne geeignete Trennflächenscharen herangezogen werden. Voraussetzung dabei ist, dass der abgerutschte Gesteinsblock an allen Seiten eindeutig durch Trennflächen limitiert ist. Nur dann lässt sich geometrisch über die Trennflächenparameter Kluftabstand und Orientierung das Volumen dieses Blocks ermitteln. Das Volumen ergibt sich aus dem Produkt der Höhe  $h_B$ , der Breite  $w_B$  und der Länge  $l_B$  des Blocks. Die Breite  $w_B$  wird in unserem Beispiel durch den Abstand der Trennflächenschar  $T_1$  bestimmt, der die laterale Begrenzung des Blocks bestimmt (Abbildung 2.12). Die Fläche, über die der Block abrutschte, ist durch die Trennflächenschar  $T_2$  bestimmt. Ihr Trennflächenabstand ist gleich der Höhe des Blocks. Die Länge des Blocks  $l_B$  ergibt sich in dem Beispiel aus dem Winkel zwischen  $T_1$  und der Schichtung  $S_0$ ,  $\alpha_B$ . Das Volumen des Blocks  $V_B$  berechnet sich nach der Formel:

$$V_B = h_B * w_B * l_B = h_B * w_B * \frac{s_B}{\sin \alpha_B} \quad 2.33$$

Die Ermittlung des Volumens ergibt sich dabei aus dem Abstand, der Mächtigkeit  $s_B$ , der Länge der Rutschoberfläche, der Breite des Blocks und dem Winkel zwischen den 2 gewählten Trennflächenscharen (Jaboyedoff et al. 2008).

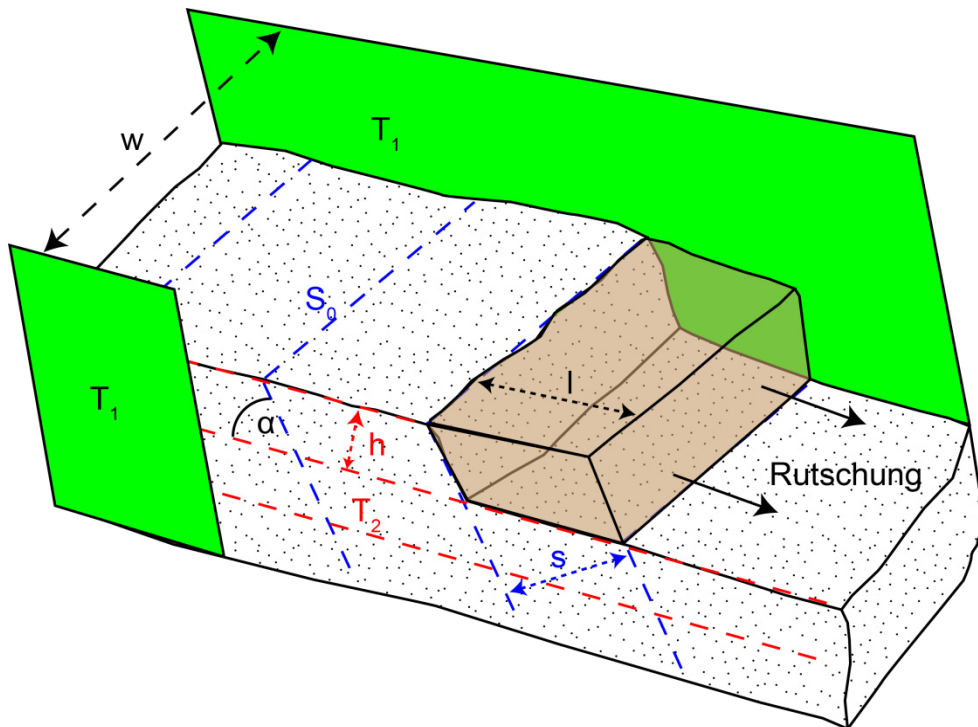


Abbildung 2.12: Volumenberechnung über bekannte Trennflächenscharen nach Abrutschen eines Gesteinsblocks (braun) ( verändert nach Jaboyedoff 2008).

## 2.9 Typ

Hiermit ist der Trennflächentyp gemeint, der sich aus der Genese der Trennflächen ergibt. Es wird eine eindeutige Zuordnung der Fläche als Kluft, Schichtung, Störung etc. vorgenommen. Da es sich bei vielen Trennflächen um Brüche handelt, wird im Folgenden verstärkt auf die Bruchbildung eingegangen. Wichtigste Vertreter sind Klüfte und Störungen.

### 2.9.1 Trennflächengese

Das mechanische Verhalten der Gesteine wird durch dessen Deformierbarkeit und Festigkeit bestimmt, wobei die Festigkeit der Widerstand des Gesteins gegen eine Verformung unter gegebenem Druck ist. Brüche wie Klüfte oder Störungen entstehen, wenn der Druck die maximale Festigkeit des Gesteins übertrifft, der zu einer Reduzierung oder einem Verlust der Kohäsion führt. Es kommt dabei zur Entstehung einer Bruchfläche mit einer relativen Bewegung entlang dieser Fläche. Die Festigkeit des Gesteins hängt unter anderem von dessen Kohäsion  $c$  und dem Winkel der internen Reibung,  $\phi$ , ab. Die Kohäsion steht für die bindenden Kräfte zwischen Mineralkörnern und der interne Reibungswinkel beschreibt den minimalen Neigungswinkel einer Materialoberfläche, bei der es zu einem Abrutschen des Materials kommt (González de Vallejo, Luis I. und Ferrer 2011).

Klüfte und Störungen im Gestein entstehen durch die Einwirkung von Spannungen unterschiedlicher Herkunft. Dazu zählen (Singhal und Gupta 2010):

- Tektonischer Stress der zu Deformation im Gestein führt
- Residuale Spannung aufgrund zurückliegender geologischer Events
- Kontraktion durch Abkühlung von Magma und Trockenrisse in Sedimenten
- Oberflächenbewegungen (Hangrutschungen oder Gletscher)
- Exhumierung von Gesteinen und dadurch abnehmender lateraler Spannung
- Verwitterung

Klüfte und Störungen treten entlang der kompletten, soliden Erdoberfläche auf und sind das Produkt spröder Deformation. Die aufgezählten Punkte der Genese a-f lassen sich in 2 Kategorien einteilen, externe (a, d, f) und interne Spannungen (b, c, e), die auf ein Gestein wirken (Fossen 2010).

### 2.9.2 Bruchkriterium

Allgemein kommt es zur Bildung von Brüchen im Rahmen spröder Verformung in der Erdkruste. Dabei hängt die Bruchbildung von der Differentialspannung und der mittleren Spannung im Gestein ab. Überschreitet die Differentialspannung die Festigkeit des Gesteins, dann kommt es zur Ausbildung eines Bruchs.

Die Spannung im Gestein an einem Punkt lässt sich über 3 Spannungskomponenten eindeutig beschreiben. Allgemein wird die Spannung an einem Punkt über die Kräfte bestimmt, die in 3 orthogonalen Raumrichtungen auf die entsprechenden Flächen eines gedachten Würfels wirken (Abbildung 2.13 links). Insgesamt sind das 3 Normalspannungen und 6 Scherspannungen, die an diese 3 Flächen auftreten. Entgegengesetzte Kräfte heben sich dabei gegenseitig auf. Wird der Würfel so ausgerichtet, dass die Scherkomponenten gleich 0 sind, verbleiben 3 Normalspannungen auf dem Würfel. Diese stellen die Hauptspannungen („Principal stresses“) oder Hauptspannungsachsen eines Spannungsellipsoids dar und bilden den Spannungstensor ab (Abbildung 2.13 rechts).

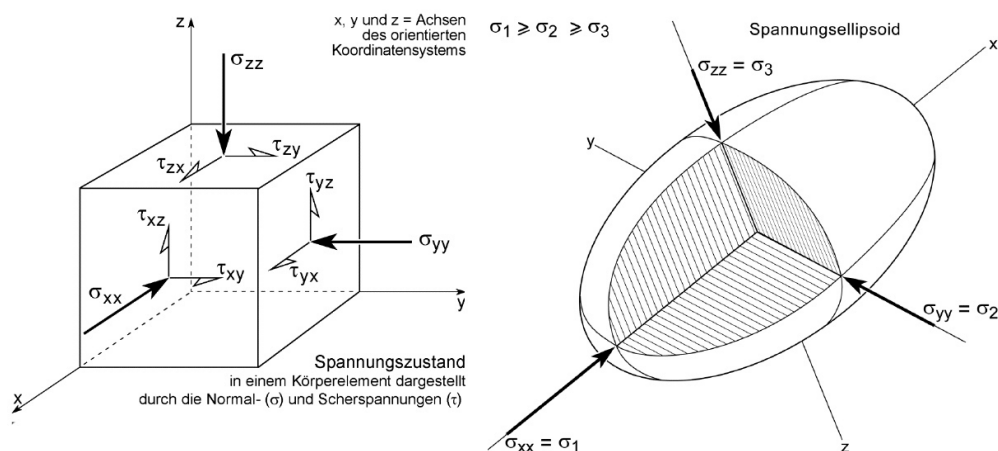


Abbildung 2.13 Darstellung der wirkenden Spannungen auf die Flächen eines Würfels (links) sowie des Spannungsellipsoids mit den 3 relevanten Spannungsrichtungen, das die Magnitude der Spannungen graphisch darstellt (aus Burg 2015).

Graphisch lässt sich das Spannungsregime durch ein Mohr-Diagramm verdeutlichen. Die x-Achse des Diagramms stellt die Normalspannung  $\sigma_n$  und die y-Achse die Scherspannung  $\sigma_s$  dar. Auf der horizontalen Achse werden die größte und kleinste Hauptspannung  $\sigma_1$  und  $\sigma_3$  eingezeichnet. Die Entfernung der Punkte zueinander ist der Durchmesser des Mohrkreises und gleichzeitig die Differentialspannung. Als Mittelpunkt des Mohrkreises dient der mittlere Abstand (mittlere Spannung) zwischen den beiden eingetragenen Hauptspannungen (Fossen 2010).

Für die Differentialspannung  $\sigma_d$  und die mittlere Spannung  $\sigma_m$  gelten (Fossen 2010):

$$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3 \quad 2.34$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad 2.35$$

Der Winkel  $\theta$  liegt zwischen der Hauptspannungsrichtung  $\sigma_1$  und der Orientierung der Bruchflächennormalen.

Ist die Differentialspannung gleich 0, so herrscht ein lithostatischer Druck, der keine Bruchbildung zulässt, da es keine bevorzugte Spannungsrichtung gibt, die auf das Gestein wirken könnte. Die Festigkeit eines Gesteins hängt neben seiner Lithologie von dessen Versenkungstiefe bzw. dem Umgebungsdruck ab. Eine höhere Versenkungstiefe bzw. tiefere Versenkung macht eine höhere Differentialspannung nötig, um das Gestein zu brechen.

Es existieren 3 Hauptbruchkriterien mit denen sich Scherbrüche in Gesteinen beschreiben bzw. erklären lassen, dazu gehören das Coulomb-Bruchkriterium, die Mohr'sche Umhüllende und das Griffith-Kriterium. Diese 3 werden im Folgenden näher beleuchtet (Fossen 2010).

### **Coulomb-Bruchkriterium**

Das Coulomb-Bruchkriterium beschreibt den Zusammenhang der Bruchbildung bei kritischer Normal- und Scherspannung (Fossen 2010). Das Kriterium beschreibt die kritische Scherspannung  $\sigma_s$ , die für einen Bruch aufgebracht werden muss in Abhängigkeit von der kritischen Normalspannung  $\sigma_n$ , dem internen Reibungswinkel  $\varphi$  und der Kohäsion  $c$  des Gesteins:

$$\sigma_s = C + \sigma_n \tan \varphi = C + \sigma_n \mu_r \quad 2.36$$

Hierbei wird  $\mu_r$  auch als Koeffizient der internen Reibung deklariert. Die Konstante  $C$  ist diejenige Scherspannung, bei der die Normalspannung 0 ist, sie wird auch Kohäsionsfestigkeit genannt. Sowohl  $C$  als auch  $\varphi$  sind das Ergebnis von Laboruntersuchungen und abhängig von Testmethode und Gestein und somit keine für Gesteinsarten allgemeingültigen Parameter (Burg 2015).

Das Coulomb'sche Bruchkriterium kann in das Mohr-Diagramm übertragen werden (Abbildung 2.14). Das Kriterium bildet hierbei eine Gerade und besagt, dass Mohr-Kreise einer Differentialspannung, die komplett unterhalb der Geraden liegen, stabil sind. Bei Berührung oder gar Überschreiten der Gerade durch den Mohrkreis mit entsprechender Differentialspannung kommt es zum Bruch.

Der Winkel des Bruchs relativ zur maximalen Hauptspannung  $\theta$  kann in diesem Kriterium in direkten Zusammenhang mit dem internen Reibungswinkel  $\varphi$  gesetzt werden. Dabei gilt für den Winkel  $\theta$ :

$$\theta = 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \quad 2.37$$

Da der innere Reibungswinkel  $\varphi$  für viele Gesteine bei ungefähr  $30^\circ$  liegt, resultiert der Winkel  $\theta$  oft zu  $60^\circ$ .

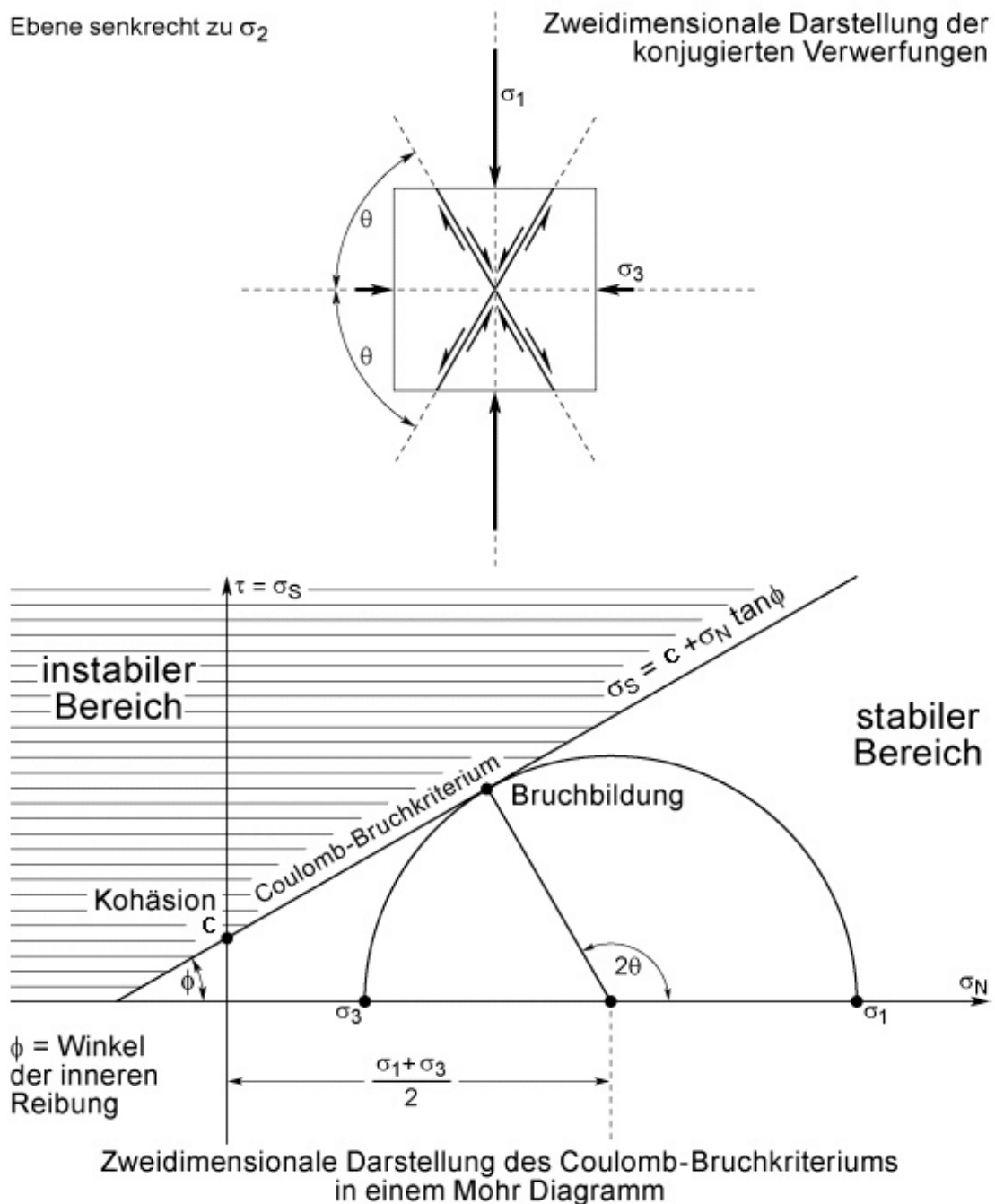


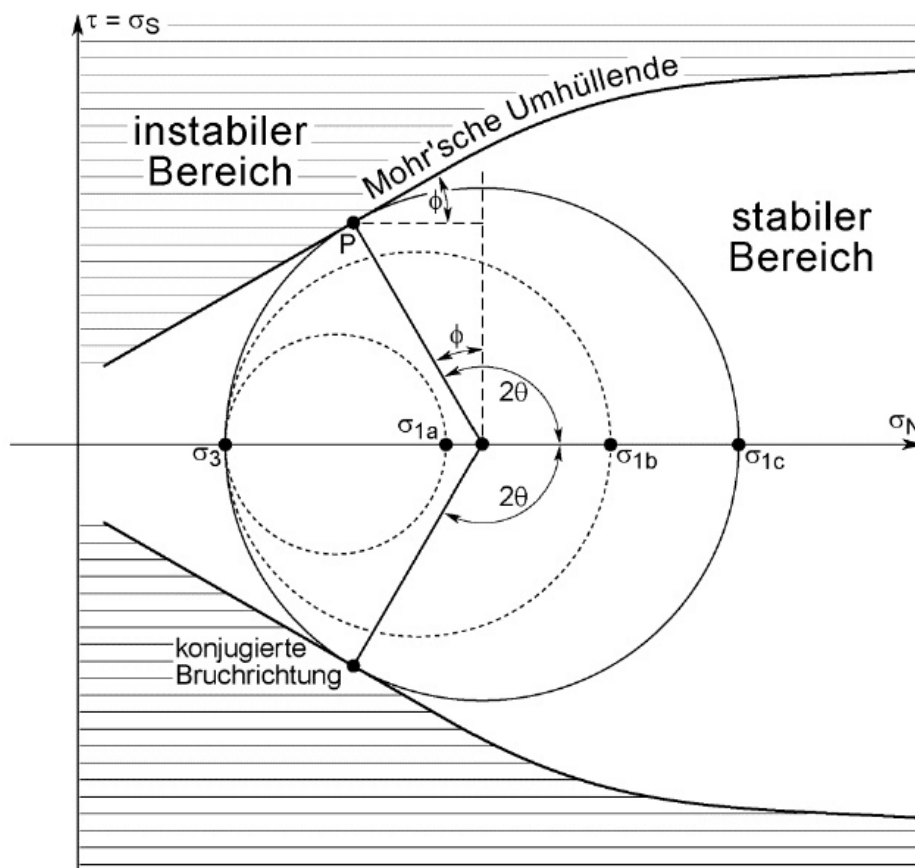
Abbildung 2.14 Graphische Umsetzung des Coulomb'schen Bruchkriteriums im Mohrdiagramm und in einer 2 dimensionalen Darstellung wirkend auf einen Gesteinskörper bei der Bildung konjugierter Scherbrüche (oben) (aus Burg 2015).

### Mohr'sche Umhüllende

Das Coulomb'sche Bruchkriterium ist nicht für alle Gesteine und Spannungsintervalle eine passende Beschreibung (Burg 2015, Fossen 2010). Der Übergang von stabilen in den instabilen Bereich ist nicht immer über einen linearen Zusammenhang beschreibbar. Die Mohr'sche Umhüllende ist ein empirisch bestimmtes Bruchkriterium, das direkt abhängig von den Gesteinseigenschaften bei unterschiedlichen Differentialspannungen ist. Bei hohem Umgebungsdruck flacht die empirische Kurve deutlich ab und wird linear entlang einer konstanten Scherfestigkeit. Hier erfolgt der Übergang in das duktile Regime (von Mises-Kriterium). Ein linearer Trend der Kurve, wie durch das Coulomb-Kriterium beschrieben, besteht nur bei mittlerem Umgebungsdruck.

Das Coulomb'sche Bruchkriterium und die Mohr'sche Umhüllende werden als Mohr-Coulomb-Kriterium für Scherbrüche zusammengefasst. Verschiedene Aussagen lassen sich aufgrund dieser Theorie über das Bruchverhalten treffen:

- Ein aus einer Differentialspannung erzeugter Mohr'scher Spannungskreis repräsentiert dann einen stabilen Zustand (d.h. das Gestein wird nicht brechen), wenn dieser unterhalb der Mohr'schen Umhüllenden liegt. Es liegt dann eine ausschließlich elastische Verformung vor (Burg 2015).
- Überschreitet oder berührt der Kreis die Umhüllende, dann erfolgt ein Bruch. Der Berührungspunkt des Kreises mit der Umhüllenden (als Tangente) bestimmt die Neigung der Bruchfläche über den Winkel  $\theta$  (Burg 2015).
- Eine zunehmende minimale Hauptspannung  $\sigma_3$  führt zu einer Abnahme des Winkels  $\theta$  (Fossen 2010).
- Die Differentialspannung nimmt mit dem Umgebungsdruck zu (Fossen 2010).
- Die abnehmende Steigung der Mohr'schen Umhüllenden stellt den Übergang des spröden in den duktilen Bereich dar (Burg 2015).
- Die Hauptspannung  $\sigma_2$  hat keinen Einfluss in dieser Theorie (Burg 2015).



**Orientierung neuer konjugierter Scherflächen,  
die dem Coulomb'schen Kriterium in einer Mohrkonstruktion entsprechen.**  
Die gestrichelten Mohrkreise stellen aufeinanderfolgende Spannungszustände ohne Bruchbildung dar.

Abbildung 2.15 Darstellung der Mohr'schen Umhüllenden im Mohr-Diagramm. Erreicht der Spannungskreis die Umhüllende, kommt es zum Bruch. Da dies im Bereich negativer als auch positiver Scherspannungen geschieht, kommt es zur Ausbildung 2er konjugierter Scherbrüche (Berührung der Umhüllenden oben und unten) (aus Burg 2015).



### Griffith-Kriterium

Das Mohr-Coulomb-Kriterium findet keine Anwendung bei der Vorhersage von Brüchen im Bereich der Zugspannung (Entstehung von Dehnungsbrüchen) (Fossen 2010, Burg 2015). Der Winkel der internen Reibung ist bei Dehnung nicht von Bedeutung und das Mohr-Coulomb-Kriterium keine hinreichende, beschreibende Bedingung dieses Zustands. Bei negativer Normalspannung nimmt die Bruchumhülle eine parabolische Form an. Diese wird durch das Griffith-Kriterium charakterisiert (Fossen 2010)). Dieser nicht-lineare Zusammenhang lässt sich über die Formel

$$\sigma_s^2 + 4T_z\sigma_n - 4T_z^2 = 0 \quad 2.38$$

beschreiben.  $T_z$  ist die kritische Zugspannung eines Materials, bei der es zur Bildung von Dehnungsbrüchen kommt. Diese hängt mit der Kohäsion  $C$  des Materials linear zusammen über  $C = 2T_z$ . So lässt sich das Mohr-Coulomb'sche Bruchkriterium neu formulieren:

$$\sigma_s = 2T_z + \sigma_n\mu_r \quad 2.39$$

So werden Mohr-Coulomb- und Griffith-Kriterium miteinander kombinierbar.

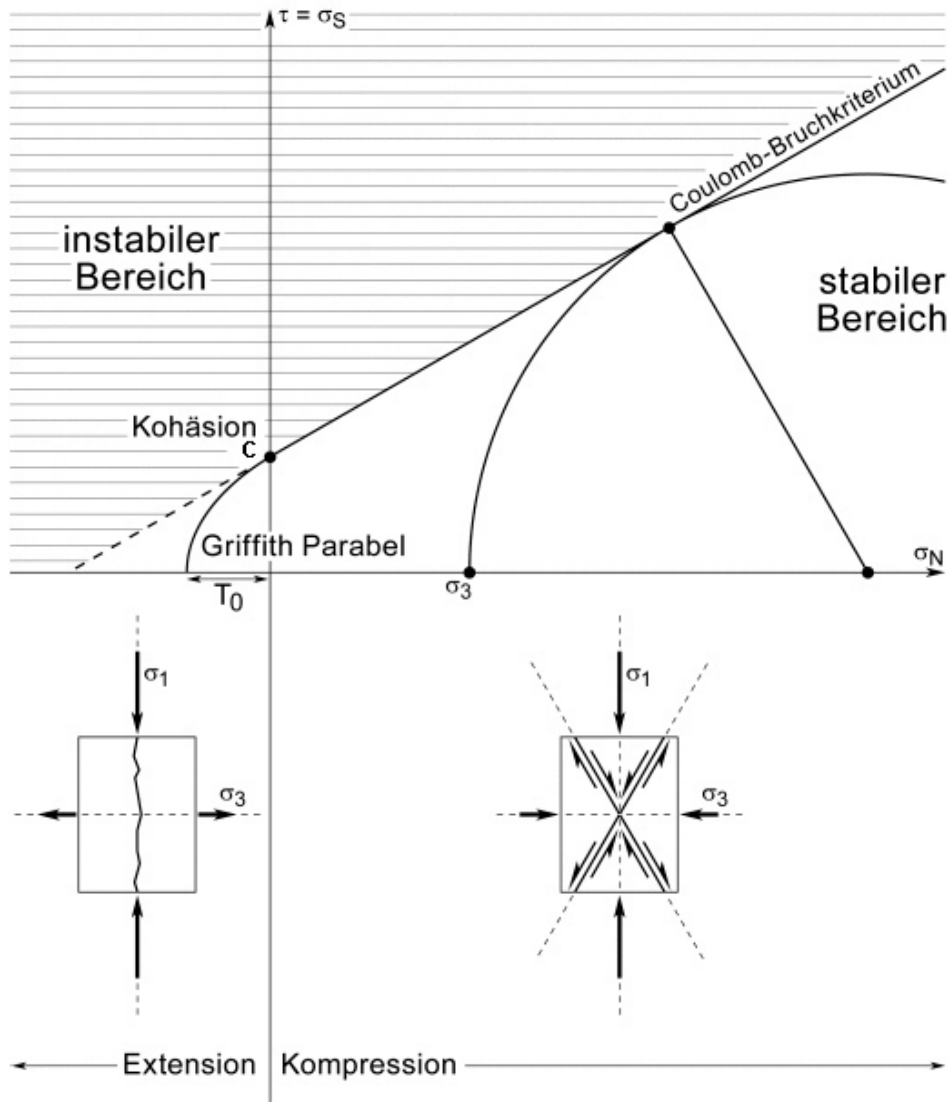
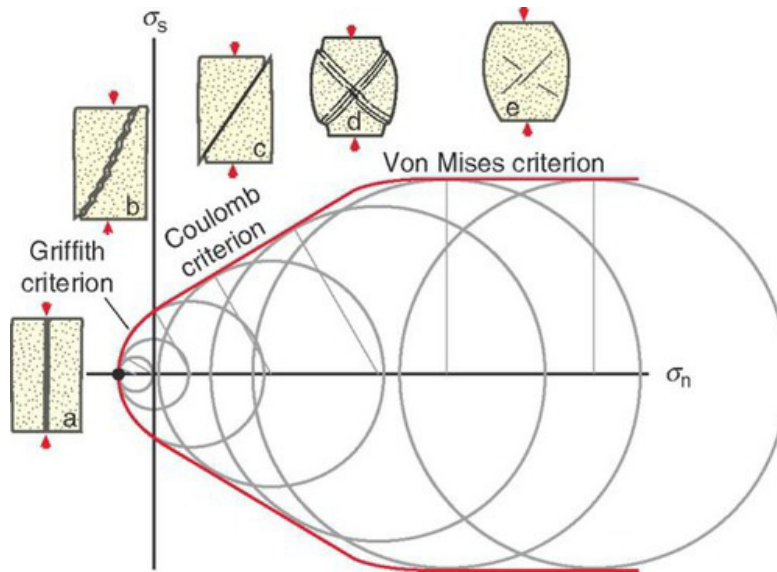


Abbildung 2.16 Erweiterung des Coulomb-Kriteriums durch das Griffith-Kriterium im Bereich negativer Normalspannung (Zugspannung). In diesem Bereich kommt es unter Extension zur Ausbildung von Extensionsbrüchen, im Kompressionsbereich zur Ausbildung von Scherbrüchen (aus Burg 2015).

### Zusammenfassung

Die Kombination aller Kriterien ist hinreichend für die theoretische Beschreibung der Bruchbildung. Das Griffith-Kriterium beschreibt den parabolischen Bereich der Zugspannungen, im spröden, kompressiven Regime findet das Mohr-Coulomb-Kriterium Anwendung und im plastischen Regime das von Mises-Kriterium. Für die meisten Gesteine liegt der Reibungskoeffizient  $\mu_r$  zwischen 0,5 und 1. Die Art des entstehenden Bruches hängt vom Verhältnis der Differentialspannung zur kritischen Zugspannung  $T_z$  ab, Es gelten folgende Zusammenhänge (Burg 2015):

- Zug-/Dehnungsbrüche:  $(\sigma_1 - \sigma_3) < 4 * T_z$
- Hybride Brüche (auch Dehnscherungsbrüche):  $5,66 * T_z > (\sigma_1 - \sigma_3) > 4T_z$
- Scherbrüche:  $(\sigma_1 - \sigma_3) > 5,66 * T_z$



**Abbildung 2.17 Zusammenfassende Darstellung aller Bruchkriterien und der sich ausbildenden Bruchformen. Damit es zum Bruch kommt, muss bei zunehmendem Umgebungsdruck auch die Differentialspannung ansteigen (Radius des Kreises) bis hinein in den Bereich des Von Mises-Kriteriums bei plastischer Verformung. a) Extensionsbrüche, b) Hybride-Scher-Dehnungsbrüche, c) reine Scherungsbrüche, d) semi-duktiler Scherbänder und e) plastische Deformation (aus Fossen 2010).**

### 2.9.3 Klüfte

Klüfte sind Trennflächen mit sehr geringem oder nicht vorhandenem Versatz entlang ihrer Öffnung. Klüfte sind diejenigen Flächen, an denen das Gestein aufgrund eines umgebenden Spannungszustandes seine Kohäsion verliert und es somit zu einem Bruch bzw. einer Öffnung kommt (Singhal und Gupta 2010).

Klüfte können tektonischen Ursprungs sein und assoziiert mit Störungen (bilden sich oft parallel zur Störung; ihre Häufigkeit nimmt mit der Entfernung zur Störung ab) oder Falten auftreten. Zudem bilden sich unter einer tektonischen Belastung oft systematische, bei dem Klüfte planar und parallel ausgebildet sind, oder orthogonale (fundamentale) Kluftsysteme. Beim letztgenannten entstehen 3 Kluftorientierungen, die senkrecht zueinander stehen. Daneben können sie magmatischen Ursprungs sein und bei der Kontraktion von Magmakammern während der Abkühlung entstehen. Dabei bilden sich oft 3 orthogonale Kluftscharen aus. Weiterhin gibt es sogenannte Relaxationsklüfte, die bei dem Wegfall lithologischer Lasten, beispielsweise bei der Exhumierung von Gesteinskörpern, entstehen. Sie liegen oft subparallel zur Topographie und ihre Frequenz nimmt mit der Tiefe ab (González de Vallejo, Luis I. und Ferrer 2011).

Das Auftreten mehrerer Kluftscharen, die sich in ihrer Raumlage unterscheiden, kann zu einem Kluftnetzwerk führen, d.h. also zu Klüften, die in verschiedene Richtungen miteinander verbunden sind. Diese Konnektivität ist zudem abhängig vom Abstand der Klüfte einer Schar und ihrer Größe. Eine erhöhte Konnektivität von Klüften kann zu erhöhten Konduktivitäten von Fluiden im Gesteinskörper führen (Singhal und Gupta 2010).

## 2.9.4 Klufthklassifizierung

Klüfte oder Brüche lassen sich auf unterschiedliche Weise klassifizieren. Zunächst lassen sie sich in systematische und nicht-systematische Klüfte differenzieren. Nicht-systematische Klüfte sind oft irregulär und kurvig, verlaufen nicht parallel und terminieren gegen andere Trennflächen. Systematische Klüfte sind planar, gleichmäßig verteilt und oft parallel. Parallele systematische Klüfte weisen ähnliche Orientierungen auf und lassen sich so einer Kluftschar zuordnen (Singhal und Gupta 2010).

Dieser allgemeinen Unterscheidung folgen eine genetische und eine geologische bzw. geometrische Klassifizierung von Klüften.

Aus den nach (Singhal und Gupta 2010) in Kapitel 2.9.1 benannten Genesen von Klüften und Störungen ergibt sich eine geologische Klassifizierung in 4 Typen nach (Nelson 2001):

1. Tektonische Klüfte (a)
2. Regionale Klüfte (b)
3. Kontraktionsklüfte (c)
4. Oberflächenbezogene Klüfte (d, e, f)

Man unterscheidet genetisch zwei Typen von Klüften bzw. allgemein Brüchen, Scher- und Extensionsbrüche. Unter Scherbrüche fallen Brüche, die eine relative Bewegung parallel zur Bruchfläche zeigen. Bei einem relativen Versatz im mm bis dm Maßstab spricht man von Scherklüften/-brüchen, während ein größerer Versatz als Störung gilt (Fossen 2010).

Extensionsbrüche zeigen eine Öffnung orthogonal zur Bruchfläche. Dazu zählen insbesondere Klüfte (joints), die oft einen kleinen extensionalen Versatz zeigen. Durch Mineralisation verfüllte Extensionsklüfte bezeichnet man als Adern.

In der Bruchmechanik ist es üblich Brüche aufgrund ihrer Versatzart in 3 Modi zu unterteilen (Abbildung 2.18). Unter Modus I fallen dabei die Extensionsbrüche. Modus II und III beschreiben Scherbrüche, die sich in der Bewegungsrichtung ihres Versatzes unterscheiden, zum einen ein Versatz parallel zur Bruchausbreitung (Modus II) und zum anderen ein Versatz orthogonal zur Ausbreitung des Bruchs (Modus III). Eine Kombination aus Modus II oder III und Modus I Brüchen führt zur Einführung eines weiteren Typs von Brüchen, den Hybridbrüchen. Sie vereinen Extensions- und Scherbewegung (Fossen 2010).

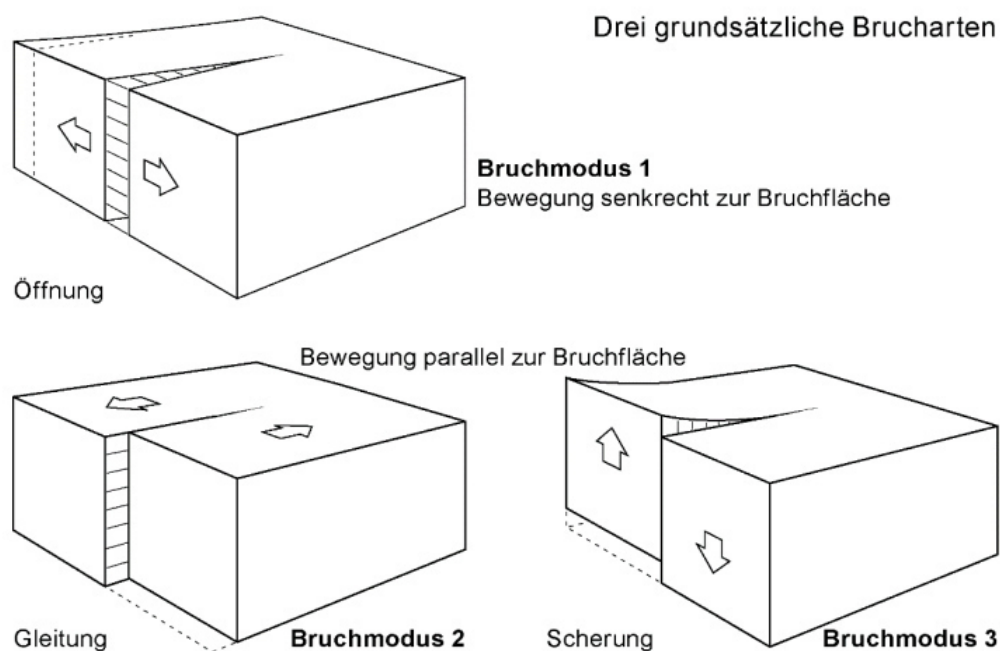


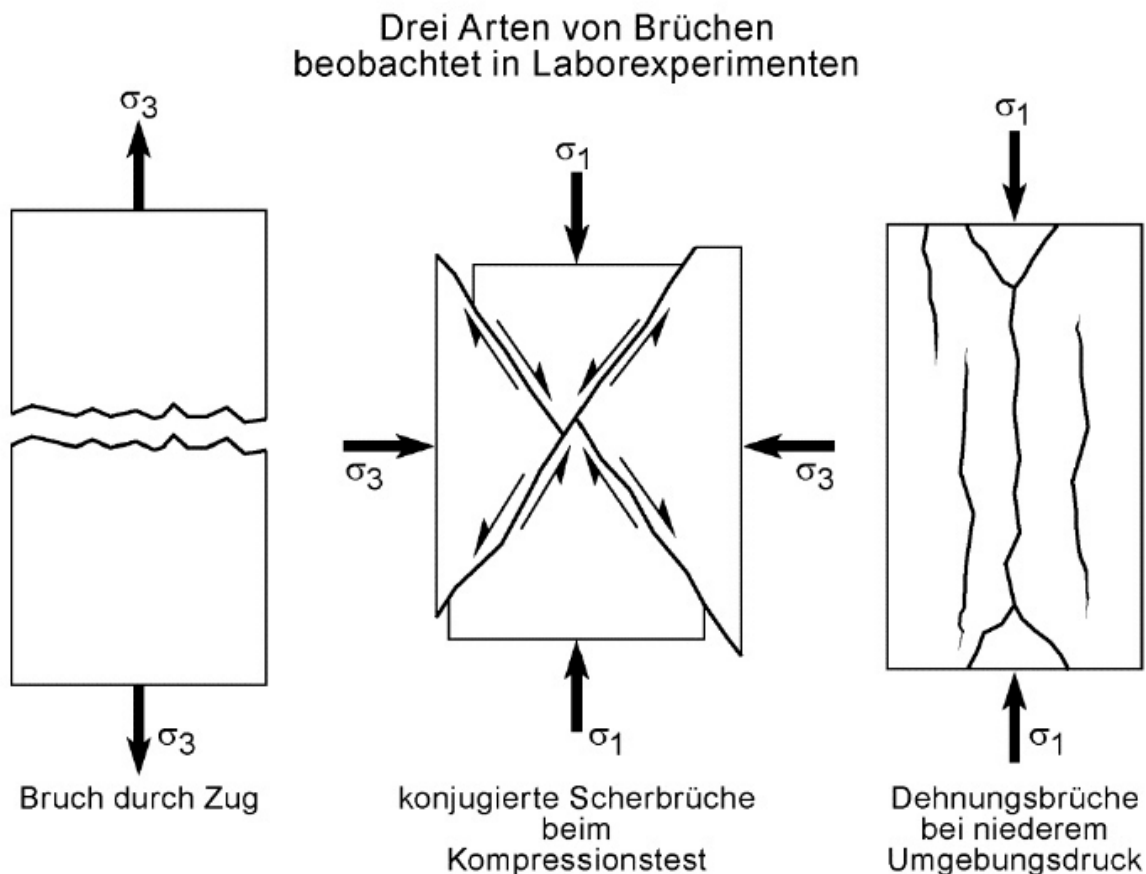
Abbildung 2.18 Darstellung der 3 zu unterscheidenden Bruchmodi (aus Burg 2015).

### Extensionsbrüche

Extensionsklüfte entstehen parallel zur größten Spannungsrichtung  $\sigma_1$  und öffnen sich idealerweise in Richtung der kleinsten Spannung  $\sigma_3$  (Abbildung 2.19 links). Die häufigste vorkommende Art an Extensionsbrüchen sind Klüfte. Sie zeigen keinen Versatz entlang ihrer Bruchfläche und entstehen meist in Regimen niedrigen Umgebungsdruck bei niedriger Differentialspannung. Sobald eine der Stressachsen im Bereich des Zugs/der Dehnung liegt (somit negativ ist), spricht man von Zug- oder Dehnungsbrüchen. Oft findet man sie nahe der Erdoberflächen in Bereichen mit negativen  $\sigma_3$ , aber auch dann, wenn hoher Fluidruck in tieferen Bereichen der Lithosphäre vorherrscht (Fossen 2010).

### Scherbrüche

Scherbrüche zeigen in Abhängigkeit von Gesteinseigenschaften und Spannungsregime einen Winkel von 20-30° zwischen der Hauptspannung  $\sigma_1$  und der sich bildenden Bruchfläche (Abbildung 2.19 Mitte). Sie bilden oft konjugierte Bruchscharen aus, wobei  $\sigma_1$  die Winkelhalbierende darstellt (Fossen 2010). Eine Mischung beider Klufttypen herrscht bei niedrigem Umgebungsdruck vor, diese Brüche werden auch Hybridbrüche genannt (Abbildung 2.19 rechts).



**Abbildung 2.19** Unterscheidung von Brüchen aus Laborexperimenten. Extensionsklüfte (links und rechts) entstehen bei einer Zugbelastung oder bei niedrigem Umgebungsdruck. Das rechte Beispiel ist eine Mischung aus Extensions- und Scherbrüchen, die man auch als Hybridbrüche bezeichnet. In der Mitte findet sich eine typische Ausbildung konjugierter Scherbrüche (aus Burg 2015).

### 2.9.5 Störungen

Im Gegensatz zu Klüften zeigen Störungen einen Versatz entlang ihrer Oberfläche und ihre Größe variiert zwischen wenigen Metern und hunderten Kilometern (González de Vallejo, Luis I. und Ferrer 2011). Auch sie sind das Resultat eines wirkenden Spannungszustandes und des teilweisen Verlusts der Kohäsion des Gesteins (Singhal und Gupta 2010).

## 2.10 Rauigkeit

Die Rauigkeit einer Trennfläche wird in Abhängigkeit vom Betrachtungsmaßstab charakterisiert. Bei der Wahl eines kleinen Maßstabs von wenigen Millimetern werden Oberflächen als rau oder glatt klassifiziert, für mittlere und große Maßstäbe im Zentimeter- und Meterbereich lauten die Bezeichnungen eben, stufig oder wellig. Oberflächen einer Trennfläche werden aus einer Kombination verschiedener Betrachtungsmaßstäbe beschrieben und ergeben dadurch Bezeichnung wie „eben rau“ (Abbildung 2.20).

Eine weitere Möglichkeit der Quantifizierung der Rauigkeit ist durch Parameter wie den „Joint Roughness Coefficient“ (JRC) gegeben.







	Rau (unregelmäßig)	Glatt
Stufig	1 	2 
Wellig	3 	4 
Eben	5 	6 

Abbildung 2.20 Diagramm aus DIN 14689-1 (Deutsches Institut für Normung 2011) zur Klassifizierung und Beschreibung von Rauigkeit der Trennflächenoberflächen. 1) stufige, raue, 2) stufige, glatte, 3) wellige, raue, 4) wellige, glatte, 5) ebene, raue und 6) ebene, glatte Oberflächen.

## 2.11 Apertur

Die Öffnungweite der Trennfläche wird als Apertur bezeichnet. Sie wird senkrecht zur Kluftfläche gemessen zwischen beiden Wänden der offenen Kluft. Die Größenordnung der Apertur beeinflusst maßgeblich das hydraulische Verhalten der Kluft, große Öffnungsweiten führen zu erhöhter Porosität und Permeabilität.

Bezeichnung für die Öffnungsweite	Öffnungsweiten
sehr eng	kleiner als 0,1mm
eng	0,1 bis 0,25 mm
teilweise offen	über 0,25 bis 0,5 mm
offen	über 0,5 bis 2,5 mm
gemäßigt weit	über 2,5 bis 10 mm
weit	über 1 bis 10 cm
sehr weit	über 10 bis 100 cm
extrem weit	größer 1 m

Abbildung 2.21 “Bezeichnungen zur Beschreibung der Öffnungsweite von Trennflächen” nach DIN 14689-1 (Deutsches Institut für Normung 2011).

## 2.12 Termination

Unter Termination oder den Terminationskriterien versteht man die Ausbildung verschiedener Klüfte zueinander. Sie gibt an, ob Klüfte verschiedenen Alters oder Genese einander durchschlagen oder gegeneinander terminieren. Oft wird die Termination in Prozent angegeben und legt so den Anteil einer Kluftschar A fest, die an einer Kluftschar B terminiert. Die Terminationskriterien bestimmen maßgeblich die Konnektivität des Netzwerks.

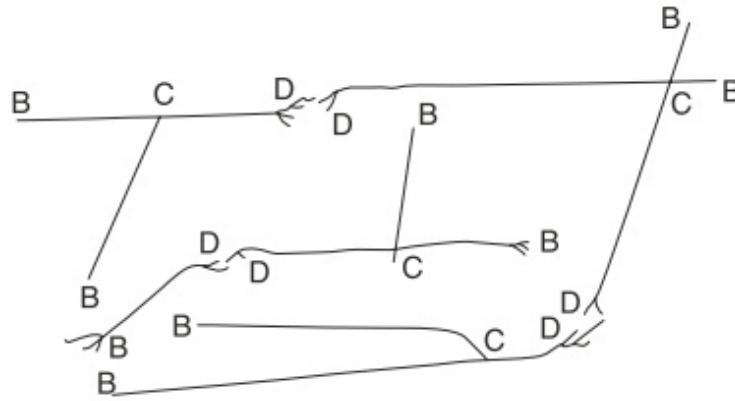


Abbildung 2.22 Verschiedene Terminationen von Trennflächen untereinander. Blinde Trennflächen, deren Ende in der Gesteinsmatrix aufgeht (B), Trennflächen, die sich gegenseitig durchschlagen (C) und diffus aneinander liegende, endende Trennflächen (D) sind wichtige Typen der Terminierung (aus Singhal und Gupta 2010).

### 2.13 Zementierung

Das innerhalb der Kluftwände verfüllte Material - oft Mineralisation von Fluidwässern - wird bei der Trennflächenbeschreibung detailliert aufgenommen. Notwendig sind hierbei eine mineralogische Beschreibung und eine Ermittlung der Größe des Materials.

### 2.14 Kluftwandstärke

Die Kluftwandstärke beeinflusst die Deformierbarkeit und Scherfestigkeit. Sie unterscheidet sich oft von der Festigkeit des Gesteins, da Verwitterung und andere Alterationsprozesse die Trennflächenwand beeinträchtigen (González de Vallejo, Luis I. und Ferrer 2011).

### 2.15 Durchflussrate

Wasseraustritte entlang von Klüften oder anderen Trennflächen, selten auch Austritte direkt aus dem intakten Gestein, werden durch die Durchflussrate beschrieben ((González de Vallejo, Luis I. und Ferrer 2011).

Bezeichnung	Durchflussrate l/s
gering	0,05 bis 0,5
mittel	0,5 bis 5
hoch	mehr als 5

Abbildung 2.23 “Bezeichnungen zur Beschreibungen der Durchflussrate von Trennflächen” nach DIN 14689-1 (Deutsches Institut für Normung 2011).

### 2.16 Festigkeit von Klüften

Die Scherfestigkeit von Klüften spielt eine große Rolle bei Stabilitätsbetrachtungen entlang von Hängen oder in Tunneln. Kluftflächen sind unter einer Scherbewegung potentiell rutschungsgefährdet. Die Festigkeit von Klüften wird über das Mohr-Coulomb-Kriterium bestimmt. Oft wird konservativ davon ausgegangen, dass die Kohäsion nur einen geringen bis keinen Einfluss auf die Scherfestigkeit der Klüfte hat. In dem Falle wird das Mohr-Coulomb-Gesetz durch das Weglassen der Variable  $c$  vereinfacht (Hudson und Harrison 1997). Es gilt für die Scherfestigkeit:

$$\tau = \sigma_n * \tan\varphi(+c) \quad 2.40$$

Daneben besteht eine weitere empirische Funktion zur Beschreibung der Scherfestigkeit entlang von Klüften und Störungen. Dieses zweite Kriterium folgt den Ergebnissen von (Bandis et al. 1983). Es basiert auf der Annahme, dass auch die Irregularitäten der Oberfläche, also dessen Rauigkeit, Einfluss auf den Scherwiderstand hat. Diese Irregularitäten lassen sich über einen Rauigkeitswinkel  $i$  beschreiben („asperity angle“), der den eigentlichen Reibungswinkel zusätzlich überlagert. Bei einem Scherversatz führt die Rauigkeit dazu, dass sich die Kluft weiter öffnet. Der effektive Reibungswinkel lässt sich aus dem Produkt von Rauigkeitswinkel  $i$  und Reibungswinkel  $\phi$  beschreiben. Eine Zunahme der Spannung auf der Kluft führt zu einer Scherung der Rauigkeit, sie wird geradezu abgeschliffen. Es bedarf also erst einer hohen Spannung auf der Kluft, um die Festigkeit der Kluftfläche aufgrund der Rauigkeit zu überbrücken, ehe es zu einer Abscherung entlang der dann abgeschliffenen Kluftflächen kommt. Der Parameter  $i$  ist allgemein schwer bestimmbar und bedarf der Ausführung von Scherversuchen (Bandis et al. 1983). Daher gilt zur Beschreibung der Scherfestigkeit  $\tau$  die empirische Annahme (Bandis et al. 1983, Hudson und Harrison 1997):

$$\tau = \sigma_n \tan(JRC \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi) \quad 2.41$$

JCS ist die „Joint Wall Compressive Strength“, die Kompressionsfestigkeit der Kluftwand. Unter hohem Druck wandelt sich dieser in den Confined compression strength (Druckfestigkeit) und wird über die Differentialspannung  $\sigma_1 - \sigma_3$  angegeben.

### 3 Terrestrisches Laserscanning (TLS)

Terrestrisches Laserscanning ist eine kontaktfreie und automatische Methode zur dreidimensionalen Erfassung von Oberflächen bzw. Objekten. Von einem festen Aufstellpunkt, der Scanposition, an der der Laserscanner meist auf ein Dreibeinstativ platziert wird, werden Laserstrahlen zu einem Messobjekt ausgestrahlt. Dabei werden die Distanz und der Winkel von Scanner zu Objekt erfasst. Es handelt sich um Entfernungsmessungen, die durch eine Horizontalrichtung und einen Zenitwinkel definiert sind (Kern 2007). Aus Distanz und Winkel werden jedem Messpunkt räumliche Koordinaten zugeordnet, die über ein kartesisches x, y, z –System definiert sind. Die Auflösung ist durch den Nutzer einstellbar und wird über die Anzahl der Messpunkte von der Hardware begrenzt. Erstellt wird eine genaue Abbildung der Oberfläche des Zielobjektes in Form einer Punktwolke, die weiteren Bearbeitungsschritten zugeführt werden kann, allgemein zählen dazu verschiedene Visualisierungen wie „Schnitte, Ansichten, Oberflächenreliefs, Soll-Ist-Vergleiche, CAD-Modelle und Kollisionsanalysen“. Die Vermessung ist absolut kontaktfrei und führt zu keiner Alteration der gescannten Oberflächen. Der Einsatz von Messmarken ist nicht erforderlich und die Scanposition frei wählbar. Das Ergebnis von mehreren Millionen Punkten ist ein echtes 3D Objekt im 1:1 Maßstab. Im Gegensatz zur Photogrammetrie, die nur über weitere Berechnungen aus 2D Bildern eine dritte Raumdimension erzeugt, ist das ein erheblicher Gewinn an Informationen. Der Vorgang ist schnell, objektiv und vollständig innerhalb der gegebenen Limitierung der Auflösung. Gerätespezifisch liefert Laserscanning eine hohe Präzision und Genauigkeit (im mm-Bereich). TLS ist zudem unabhängig von den Lichtverhältnissen und erreicht hohe Reichweiten, die bei einigen Geräten im niedrigen Kilometerbereich angesiedelt sind. Wichtig bei TLS sind ein stabiler Gerätestandpunkt und diffus reflektierende Zielobjekte. Bei der Entfernungsmessung unterscheidet man zwei Gerätetypen (Kern 2007, Ferrero et al. 2009 und Kemeny 2008):

- 1.) Impulslaufzeit: Ein ausgeschickter und reflektierter Lichtimpuls wird mit einer Zeitdifferenz wieder vom Scanner als Eingangssignal registriert. Dadurch werden große, messbare Entfernungen möglich. Im Gegensatz zur Phasenlaufzeit leidet aber die Genauigkeit und Geschwindigkeit (Kemeny 2008, Reshetyuk 2006).
- 2.) Phasenlaufzeit: Ein sehr schnelles Verfahren, allerdings mit geringerer Reichweite als das Impulslaufzeitverfahren. Über ein kontinuierlich gesendetes Laserlicht wird eine Sinuswelle aufmoduliert. Ausgesandte und reflektierte Welle weisen einen Phasenlaufzeitunterschied aus. Dieser Unterschied ist die Grundlage zur Berechnung der Entfernung (Kemeny 2008, Thiel et al. 2005).

Für das TLS haben sich viele verschiedene Einsatzgebiete entwickelt, dazu zählen ((Kern 2007):

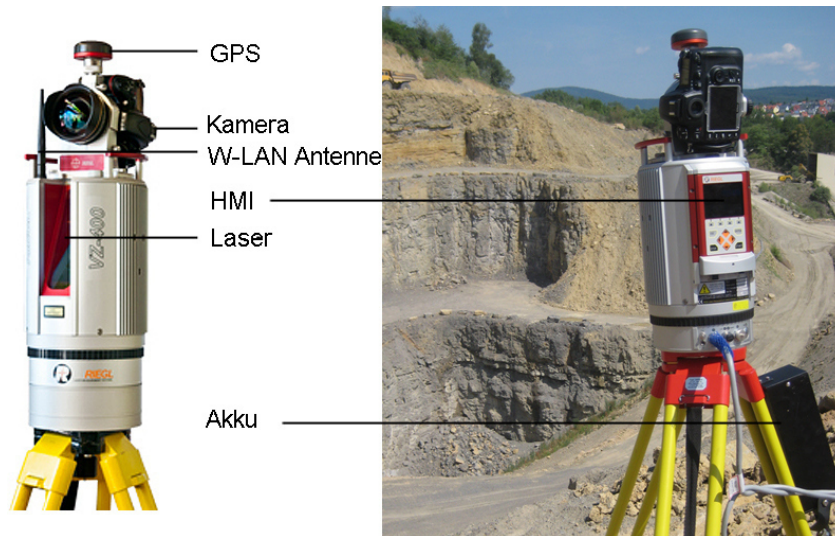
- Objekte einer Größe von wenigen Zentimetern bis in den Kilometerbereich
- Baudenkmalpflege, Archäologie
- Architektur
- Maschinenbau
- Tunnelbau
- Volumen- und Erdmassenberechnungen
- Tatortvermessung/Unfallforschung
- Visualisierung und Simulation
- Erzeugung von 3D-Stadtmodellen
- Deformationsbestimmung an Bauwerken
- Geowissenschaften allgemein

#### 3.1.1 Technische Grundlagen und Funktionsweise eines terrestrischen Laserscanners

Für diese Arbeit wird der VZ400 Laserscanner der Firma Riegl genutzt (Riegl LMS 2014). Dieser Scanner erlaubt eine maximale Reichweite von 600 Metern bei bis zu 122000 Messungen pro Sekunde. Dabei hat er eine Genauigkeit von 5 mm und eine Präzision von 3 mm. Die Genauigkeit bestimmt dabei die Übereinstimmung zwischen gemessenem Wert und wahren Wert. Die Präzision hingegen ist ein Maß für die Reproduzierbarkeit einer Messung unter konstanten Bedingungen. Das Sichtfeld des Scanners beträgt 360° in der Horizontalen - durch die Rotation des Geräts um sich selbst



- und 100° in der Vertikalen. Die Dauer eines Scanvorgangs hängt von der Größe des Sichtfelds sowie der eingestellten Auflösung ab. Panorama-Scans, die einer schnellen 360° Rundumsicht dienen mit einer Auflösung von ungefähr 7 cm auf eine Entfernung von 100 Metern, werden in weniger als 5 Minuten erzeugt. Der Scanner arbeitet mit einem Laser der Klasse 1 und ist daher weitgehend ungefährlich für das menschliche Auge. Der Laser des Geräts arbeitet mit einer Wellenlänge im nahen Infrarotbereich (1550 nm).



**Abbildung 3.1** Abbildung des eingesetzten Riegl VZ400 (links, aus Riegl LMS 2014) mit angeschlossener Kamera und GPS. Das HMI (Human-Man-Interface) dient der Bedienung des Geräts, das den Laser an seiner Frontseite über rotierende Spiegel entlang der Oberfläche gleichmäßig verteilt (Bild rechts: Laux 2013).

Der Laserscanner basiert auf dem Impulslaufzeitverfahren. Für die Distanzberechnung gilt (Kemeny 2008):

$$d_{TLS} = \frac{c_L * \Delta t_L}{2} \quad 3.1$$

Mit  $d_{TLS}$  als der Distanz von Scanner zu Messpunkt [m],  $c_L$  der Lichtgeschwindigkeit [m/s] und  $\Delta t_L$  der Laufzeit des Lasers [s]. Die Laserstrahldivergenz beträgt 0,35 mrad. Bei einer Entfernung von einem Meter zu einem Zielobjekt beträgt der Durchmesser des Laserpunktes somit 0,35mm und erhöht sich bei einer Entfernung von 100 Metern bereits auf 35 mm. Damit sich bei benachbarten Messpunkten die Laserpunkte nicht überschneiden, muss die Auflösung entsprechend eingestellt werden. Die Einstellung der Auflösung erfolgt über das Einstellen der „Winkelschritte“ zweier Punkte. Der winkelbezogene Abstand, der am Scanner gewählt wird, bestimmt die Auflösung am Zielobjekt. Diese liegt in der Vertikalen zwischen 0,0024° und 0,288° sowie in der Horizontalen zwischen 0,0024° und 0,5°. So beträgt der Punktabstand bei einem Winkelabstand von 0,04° in 100 Meter Entfernung knapp 6,9 cm.

Zwei allgemeine Modi stehen dem Nutzer zur Verfügung, der „Long range mode“ für Entfernungen bis zu 600 Meter und der „High speed mode“ mit geringer Reichweite aber erhöhter Geschwindigkeit (Tabelle 3.1).

Da zur Reduzierung des Laserschattens - Bereiche außerhalb des Sichtfelds des Scanners - mehrere Scanpositionen notwendig sind, erfolgt eine softwaretechnische Registrierung der Punktwolken in der Nachbearbeitung durch einen ICP-Algorithmus („iterative-closest-point“).

Der Scanner ermöglicht die feste und ausgerichtete Anbringung einer Spiegelreflexkamera, die es erlaubt jeder einzelnen Messung der Punktwolke nachträglich einen RGB-Farbwert zuzuordnen.

Direkt vom Gerät wird jedem Messpunkt ein Amplitudenwert zugeordnet. Dieser bezieht sich auf die Intensitätsabschwächung des Laserstrahls durch die Reflektion an einem Objekt. Er hängt neben den Reflexionseigenschaften des Materials auch von der Distanz ab. Diese Distanzabhängigkeit wird vom Gerät gefiltert und so ein distanzunabhängiger Reflektionswert bereitgestellt. Im Rahmen der

Visualisierung bietet dieser Wert enorme Vorteile gegenüber einer einfachen Amplitudenanzeige, da Materialdetails und -unterschiede deutlicher sichtbar gemacht werden.

Insgesamt werden jedem Punkt seine Lokation über (x,y,z)-Raumkoordinaten, die relativen Winkel zum Laserscanner, ein Amplituden- sowie Reflektionswert, ein Qualitätsmerkmal (Deviation), ein Echobezug und ein RGB-Wert zugeordnet. Das Qualitätsmerkmal weist auf die Eindeutigkeit eines Punktes hin, in Randbereichen markiert der auftretende Laser nicht eindeutig den Rand, sondern verläuft teilweise über diesen hinaus. Diese Eigenschaft wird über das Qualitätsmerkmal quantifiziert. Trifft ein Laser nicht nur einzeln auf ein Zielobjekt, beispielsweise eine Gesteinswand, sondern schon vorher auf Ecken und Kanten, kommt es zudem zu einem mehrfachen Echo. Pro ausgegebenen Laserstrahl registriert das Gerät mehrere zurückkommende Signale (Echos). Diese werden in der Reihenfolge ihres Eintreffens registriert und als Eigenschaft den Punkten zugeordnet.

Tabelle 3.1 Technische Merkmale des Riegl VZ 400 (Riegl LMS 2014).

	Long range mode	High speed mode
<b>Frequenz</b>	100 kHz	300 kHz
<b>Effektive Messrate (Messungen pro Sekunde)</b>	42.000	122.000
<b>Max. Messdistanz</b>		
<b>Natürliches Objekt p 90 %</b>	600 m	600 m
<b>Natürliche Objekte p 20 %</b>	280 m	160 m
<b>Laserklasse</b>	1	
<b>Genauigkeit (accuracy)<sup>*1</sup></b>	5 mm	
<b>Präzision / Reproduzierbarkeit (precision)<sup>*2</sup></b>	3 mm	
<b>Mindestentfernung</b>	1,5 m	
<b>Laser Wellenlänge</b>	1.550 nm (Nahinfrarot)	
<b>Laserstrahldivergenz</b>	0,35 mrad	
<b>Gesichtsfeld</b>	100° vertikal	
	360° horizontal	

<sup>\*1</sup>: Übereinstimmungsgrad der Messgröße zum wahren Wert  
<sup>\*2</sup>: Übereinstimmungsgrad mit weiteren Messungen

### 3.1.2 Verwendung des TLS in den Geowissenschaften

Das terrestrische Laserscanning ist ein in geologischen und geotechnischen Feldmessungen etabliertes Verfahren (Ferrero et al. 2009, Ahlgren und Holmlund 2003, Slob 2010, Jaboyedoff et al. 2008, Buckley et al. 2008). Die Erstellung von dreidimensionalen Punktwolken aus realen Aufschlüssen erlaubt eine Vielzahl von Anwendungen, wie beispielsweise Volumenkalkulationen im Tagebau, Hangrutschungscharakterisierungen oder das Monitoren von Hangstabilitäten (Kassebaum 2012, Hu et al. 2010, Jaboyedoff et al. 2012, Strouth et al. 2005, Haneberg 2008, Du und Teng 2007). Das TLS liefert außerdem eine umfassende Datenbasis für Kluftnetzwerk- und Trennflächenanalysen (Lato und Vöge 2012, Gaich et al. 2006, Ferrero et al. 2009, Lato et al. 2009). Diese umfassende Datenbasis kann die statistische Signifikanz darauf basierender Discrete-Fracture-Network (DFN-) Modelle erhöhen (Ahlgren und Holmlund 2003, Wilson et al. 2011, Dershowitz et al. 2004, Dershowitz et al. 1998). Aktuelle Anwendungen beziehen sich immer mehr auf die Einarbeitung der Amplitudenwerte des Laserstrahls. Dieser dient der Identifizierung unterschiedlicher Lithologien oder Feuchtegehalte im Gestein (Franceschi et al. 2009, Hartzell et al. 2014, Burton et al. 2011).

## 3.2 Software

Zur Bearbeitung der Rohdaten (RiSCAN Pro), Weiterbearbeitung der Punktwolken (MeshLab, CloudCompare), Auswertung (CloudCompare, SplitFX, R) sowie Modellierung (Fracman) werden verschiedene Programme genutzt. Diese werden im Folgenden vorgestellt.

### 3.2.1 RiSCAN Pro

RiSCAN Pro wird in der Version 1.7.9 verwendet (Riegl LMS 2013). Es ist die passende Bearbeitungssoftware der Firma Riegl zum Riegl VZ400 und anderen Scannern der VZ-Serie. Es dient der Aufarbeitung der Rohdaten aus dem Laserscan. Diese werden in das Programm importiert, georeferenziert, registriert und bereinigt. Die Georeferenzierung erfolgt entweder durch das integrierte, aber ungenaue GPS oder über bekannte Fixpunkte. Die Registrierung kann manuell, über Markierungen am Zielobjekt oder automatisch mithilfe eines ICP-Algorithmus erfolgen. Für die Bereinigung stehen manuelle und automatische Filter zur Verfügung, die unter anderem unterstützend bei der Entfernung der Vegetation eingesetzt werden. Ein eingebauter Filter (*plane patch filter*) kann zur Berechnung von Normalenvektoren auf Flächen eingesetzt werden.

### 3.2.2 MeshLab

MeshLab in der Version 1.3.2 (ISTI - CNR 2013) ist eine Software zur Weiterverarbeitung von registrierten und bereinigten Punktwolken. Die Software wird zur Triangulation der Oberflächen durch eine Poisson-Rekonstruktion eingesetzt. So lassen sich einfache Oberflächenmodelle erstellen.

### 3.2.3 CloudCompare

Auch zur Bereinigung und Klassifizierung der Punktwolken wird CloudCompare in der Version 2.6.0 und 2.6.2 (EDF R&D 2014) eingesetzt. Weiterhin bietet die Software die Möglichkeit der Flächenerkennung (RANSAC) und Berechnung der Normalenvektoren und bietet so die Grundlage zur Quantifizierung verschiedener Trennflächenparameter.

### 3.2.4 SplitFX

SplitFX der Firma Split Engineering (Split Engineering LLC 2010) ist eine Software, die Orientierung von Flächen aufgrund einer 2.5D Triangulation der Punktwolke berechnet.

### 3.2.5 R

Die Berechnungen verschiedener Trennflächenparameter aus den Flächeninformationen (aus RiSCAN Pro, CloudCompare oder SplitFX) basiert auf verschiedenen mathematischen Berechnungen, die mithilfe der Software R (2.15.2, R Core Team 2013) ausgeführt werden. R ist eine Programmiersprache zur Lösung und Berechnung statistischer Fragestellungen und deren graphischer Darstellung.

### 3.2.6 Fracman

Fracman 7.5 (Golder Associates 1999-2015) ist eine Software zur Analyse und Modellierung geklüfteter Gesteinskörper bzw. Reservoirs. Sie ermöglicht die Erstellung von DFN Modellen aus statistischen Eingabedaten und nutzt als Rahmen geologische Strukturmodelle aus der Seismik oder aus Bohrungen. Neben der reinen Erstellung der DFN Modelle werden Trennflächenparameter zur Auswertung hydraulischer oder geomechanischer Parameter, zur Subsidenzberechnung, zum Vorhersagen der Bruchbildung bei hydraulischem „Fracking“ oder Stabilitätsanalysen aufskaliert.

## 3.3 Aufbereitung der TLS Daten

Die Punktwolke unterliegt vor der Untersuchung von Trennflächenparametern einer umfangreichen Bearbeitung, dazu gehören die Registrierung und Bereinigung der Daten. Die einzelnen Arbeitsschritte von der Aufnahme, über die Rohdaten bis hin zur bearbeitbaren Punktwolke sind in diesem Kapitel aufgeführt.

### 3.3.1 Aufnahme im Gelände

Bei der Aufnahme im Gelände müssen verschiedene Aspekte berücksichtigt werden. Zunächst muss die Anzahl günstiger Scanpositionen bestimmt werden, die Schattenbereiche minimieren. Für jede Position muss eine adäquate Auflösung am Scanner gewählt werden, die der Fragestellung der Arbeit

entspricht. Die Erstellung eines reinen Oberflächenmodells bedarf nur grober Auflösungen im Gegensatz zur Beurteilung von Oberflächenrauigkeiten. Die Anzahl der Positionen wird auch von der vorgegebenen Bearbeitungszeit vor Ort bestimmt. Unter Zeitnot können nur wenige Positionen gewählt werden, die einen Bereich ausreichend abdecken, auch wenn eventuell Abstriche in der Auflösung die Folge sind oder Schattenbereiche gehäuft auftreten. Ein wichtiger Punkt ist die Zugänglichkeit des Zielobjektes und eine ausreichende Entfernung zum Objekt, so dass dieses komplett innerhalb des Sichtfelds des Scanners liegt.

### 3.3.2 Registrierung der Punktwolke

Um die Punktwolken zu registrieren ist zunächst ein Transfer der Daten vom Laserscanner zur Software RiSCAN Pro nötig. Über die Erstellung eines neuen Projekts werden die Daten importiert. In einem ersten Bearbeitungsschritt können nun bestimmte Scanpositionen über einen extern gemessenen Fixpunkt georeferenziert oder direkt eine Registrierung der Punktwolken durchgeführt werden. Dazu wird eine georeferenzierte Scanposition fixiert und alle überlappenden Punktwolken dieser Position angepasst. Dies geschieht durch einen ICP-Algorithmus („iterative closest point“), ein iterativer Prozess, bei dem der nächstliegende Punkt der Wolke A zur Wolke B bestimmt wird. Für die Punktwolken werden Koordinatentransformationen bestimmt, die die Summe der Quadrate der Abstände zueinander minimieren (Riegl LMS 2013, Horn 1987). Da die Durchführung des ICP Algorithmus an Datensätzen mit mehreren Millionen Punkten zeitaufwändig ist, wird die Punktwolke auf Referenzpunkte dezimiert. Bei der Findung hilft der „plane patch filter“, der durch Normalvektoren definierte Referenzpunkte erstellt. Die Registrierung im Programm erfolgt durch das „Multi-Station Adjustment“ (Riegl LMS 2013). Die Standardabweichung der Abweichungen der Referenzpunkte zueinander dient als Orientierungswert bei der Beurteilung des Ergebnisses. Jedoch sollte stets eine visuelle Überprüfung durch den erfahrenen Anwender erfolgen.

Die Fixierung einer Scanposition ist wichtig, um bei der Anpassung der Punktwolken zueinander die Nordausrichtung nicht einzubüßen. Letztere ist essentiell zur weiteren Bestimmung von Trennflächenparametern. Die Nordrichtung sollte auch mithilfe einer Referenzmessung überprüft werden. Hierzu erfolgt die Einzelbestimmung der Orientierung einer großen Fläche, die auch händisch vor Ort bestimmt wird. Der Vergleich muss eine hohe Übereinstimmung aufweisen.

Über die montierte Kamera erstellte RGB-Fotos können auf Wunsch jedem Punkt des Modells zugeordnet werden. Dies geschieht über eine vorkalibrierte Transformationsmatrix und erhöht die Möglichkeiten der Visualisierung.

### 3.3.3 Entfernen von Vegetation und Artefakten

Die registrierte Punktwolke wird vor der Trennflächenaufnahme von Vegetation und Artefakten befreit, um eine Verfälschung der Ergebnisse zu verhindern. Dies gilt insbesondere für Artefakte entlang der Aufschlusswand, die es dringend zu entfernen gilt.

#### **RiSCAN Pro**

Dazu stellt RiSCAN Pro eine Reihe von Filtern zur Verfügung, die im Einzelnen in der sich anschließenden Auflistung beschrieben sind.

1. **Deviation Filter:** Filtern von Punkten, die bestimmte Bedingungen nicht erfüllen. Jeder Punkt erhält ein Qualitätsmerkmal, beispielsweise seine Eindeutigkeit. Punkte unterhalb eines Schwellenwerts können gefiltert werden. Oft handelt es sich um Punkte, bei denen der Laser nur sporadisch die Zielfläche erfasst hat, beispielsweise an Ecken und Kanten.
2. **Echo Filter:** Einzelne Messpunkte können mehrere Echos erzeugen (reflektierte Zielpunkte). Dies geschieht oft beim Scannen durch Vegetation hindurch auf ein dahinter liegendes Objekt. Die Ziele werden geordnet nach ersten (*first*), weiteren (*other*) und letzten (*last*) Zielen (targets). Davon getrennt werden „single targets“ betrachtet, die keine weiteren Echos aufweisen.
  - a. Filtern der „first“ und „other“ Echos, um Vegetation und andere Artefakte zu entfernen.

- b. Einsatz des Echo Filters: Auswahl und Übernahme nur der „Last“ und „Single“ Echos.

Der Einsatz des Filters führt nicht zu einer Reduzierung der Punkte auf der Aufschlusswand und kann bedenkenlos eingesetzt werden.

3. **Terrain Filter:** Bei geraden Gesteinswänden mit minder ausgeprägtem Relief bietet sich die Erstellung einer repräsentativen Fläche an. Diese wird als Mittel durch alle Punkte der Wand gelegt. Anschließend werden durch geschickte Wahl der Parameter des Terrain Filters überflüssige Punkte gelöscht.  
Bei diesem Filter wird ein Raster parallel zu einer erzeugten Fläche erstellt. Die Kantenlänge einzelner Rasterelemente wird über den Zusammenhang „Grundrastergröße\*Anzahl der Ebenen“ gewählt. Anschließend wird innerhalb jedes Rasterelements ein repräsentativer Punkt gewählt und lokal die Oberfläche über diese Punkte definiert. Toleranzbereiche über und unter dieser Oberfläche werden gemäß „Toleranzfaktor =  $x \cdot \text{Grundrastergröße}$ “ charakterisiert. Alle Punkte außerhalb dieser Toleranz werden als „off-terrain“ markiert und gelöscht. Diese Schritte werden mit kleineren Rastergrößen wiederholt, bis die unterste Ebene erreicht ist (Grundrastergröße).
4. **RGB Filter:** Die Auswahl bestimmter Farbwerte innerhalb des RGB Farbraums ist möglich. So lässt sich beispielsweise ein bestimmter Bereich von Grüntönen markieren und löschen.
5. **Reflektionen/Amplituden Filtern:** Oft markieren bestimmte Reflektionsbereiche (oder Amplitudenbereiche in Polydaten) Vegetation. Diese lassen sich separat anwählen und löschen. Meist gilt dies für Reflektionswerte unterhalb -8db.
6. **Octree Filterung:** Würfel einer vordefinierten Größe werden bei diesem Filter über die Punktwolke homogen verteilt (über ein Inkrement anzugeben). Jeder der Würfel enthält einen repräsentativen Punkt, der aus allen Punkten innerhalb dieses Würfels berechnet wird. Dieser Punkt ist der geometrische Schwerpunkt aller Punkte innerhalb des Würfels. Isolierte Punkte können über die Option „remove cells containing only 1 point“ gelöscht werden.

### CloudCompare

Wie in RiSCAN Pro ist auch CloudCompare mit einem Algorithmus ausgestattet, der den Anwender bei der Entfernung störender Vegetation unterstützt. Dieser basiert auf der Arbeit von (Brodu und Lague 2012). Dieser Algorithmus nennt sich CANUPO und dient der automatischen Klassifizierung von Punktwolken. Der Algorithmus kann frei trainiert/definiert werden, um Punktbereiche aufgrund verschiedener Ausprägung voneinander zu trennen (EDF R&D 2014). So ist die Abtrennung von Vegetation und Gesteinsoberfläche möglich.

### 3.3.4 Triangulation der Daten

Die Triangulation der Daten nach der hier vorgestellten Methode ist bei der Erstellung eines digitalen Höhenmodells bzw. Oberflächenmodells anzuwenden. Für die Triangulation wird die Software Meshlab gewählt. Die Triangulierung erfolgt auf Basis der komplett bereinigten Punktwolke. Zunächst ist eine Reduzierung der Punktwolke empfehlenswert. Dies wird am besten über ein „poisson disk sampling“ erreicht. Dieser Algorithmus erzeugt kreisrunde Fenster über die Oberfläche der Punktwolke und kalkuliert, welche Punkte innerhalb dieses Fensters als „statistisch zufällig“ gemäß einer Poissonverteilung gelten. Hierbei werden verschiedene Parameter festgelegt, darunter die Anzahl der Proben und der Radius des Fensters. Die Werte der beiden Parameter sollten zwischen zehn- und hunderttausend Proben sowie einem Radius von 200 liegen, um zufriedenstellende Ergebnisse zu erhalten. Eine erhöhte Zahl an Proben führt zu einer größeren Punktdichte. Die Anzahl der Proben sollte proportional zur Modellgröße gewählt werden. Für kleine Aufschlüsse reichen bereits 10000 Punkte zu Erstellung eines einfachen Oberflächenmodells. Nach der Berechnung von Normalvektoren auf der Punktwolkenoberfläche wird eine *Poisson Surface Reconstruction* eingesetzt, um die Punktwolke zu triangulieren. Eine gewählte Octree-Tiefe von 9 und ein „Solver Divide“ eignen sich für diesen Algorithmus. Dieser nutzt die Punkte und die Normalen um eine Poissonoberfläche und schlussendlich die Triangulation zu erstellen. Eine erhöhte Octree-Tiefe führt zu einer erhöhten Anzahl an Dreiecken, die Triangulation wird feiner. Danach können das fertige triangulierte Netz simplifiziert oder Unebenheiten eingeebnet werden.

### 3.3.5 Praktische Hinweise

Die Wahl der Aufstellpunkte ist essentiell, ebenso die gewählte Auflösung vor Ort. Fehlende Bereiche und niedrige Punktdichten können nicht mehr korrigiert werden. Zwar tendieren viele Anwender dazu große Datenmengen zu erzeugen, die dann über Software wieder reduziert werden müssen. Dabei darf man aber nicht vergessen, dass es sich bei der Aufnahme des Laserscans um eine Konservierung des Ist-Zustands handelt. Bei der nächsten Begehung eines Aufschlusses kann sich dieser schon unwiederbringlich verändert haben. Eine Reduzierung großer Datenmengen erfolgt problemlos über RiSCAN Pro oder CloudCompare.

Statt umständlich Vegetationsfilter einzusetzen, kann der zu untersuchende Bereich aus der gesamten Punktwolke herausgeschnitten werden. Durch einfache Anwahl aller Punkte einer Aufschlusswand kann diese extrahiert und einzeln weiterbearbeitet werden. Ein Großteil störender Artefakte und vegetativer Bedeckung sind durch diesen Schritt beseitigt. Die Anwendung von Filtern erfolgt dann nur für Vegetation, die direkt auf der Aufschlusswand sitzt. Hier zeigt sich oftmals, dass manuelles Entfernen die schnellere Methode darstellt als die Anwendung komplizierter Algorithmen.

## 4 Aufschlussanaloge

Als Anwendungsgebiete für die entwickelten Methoden werden 3 Aufschlüsse gewählt. Dabei handelt es sich um teilweise noch aktive Steinbrüche. Die Aufschlüsse wurden anhand ihrer Eignung für die jeweilige Fragestellung ausgewählt (siehe Tabelle 4.1).

Zur Ermittlung der **Raumlage** der Trennfläche wird ein Aufschluss mit einem einfachen orthogonalen Kluftsystem gewählt. Dazu wird der **Römersteinbruch** bei Bad Dürkheim gewählt. Dieser zeichnet sich durch sein ausgeprägtes Relief aus, das die Erfassung von Flächen zur Ermittlung der Orientierung dieser Fläche vereinfacht. Es gibt zwei markante Trennflächenorientierungen, die orthogonal

Als Anwendungsgebiete für die entwickelten Methoden werden 3 Aufschlüsse gewählt. Dabei handelt es sich um teilweise noch aktive Steinbrüche. Die Aufschlüsse wurden anhand ihrer Eignung für die jeweilige Fragestellung ausgewählt (siehe Tabelle 4.1).

1. Zur Ermittlung der **Raumlage** der Trennfläche wird ein Aufschluss mit einem einfachen orthogonalen Kluftsystem gewählt. Dazu wird der so genannte **Römersteinbruch** bei Bad Dürkheim gewählt. Dieser zeichnet sich durch sein ausgeprägtes Relief aus, dass die Erfassung von Flächen zur Ermittlung der Orientierung dieser Fläche vereinfacht. Es gibt zwei markante Trennflächenorientierungen, die orthogonal zueinander stehen und wenig Variation zeigen.
2. Der **Römersteinbruch** eignet sich aufgrund seines markanten Reliefs ebenso zur Quantifizierung der **Intensität** des Auftretens der Trennflächen. Die vorgestellte Methode impliziert das virtuelle Erzeugen von sogenannten Scanlines entlang der Aufschlusswand. Die Morphologie des Aufschlusses mit seinem tiefen Einschnitt winkelhalbierend durch das orthogonale Trennflächenmuster erleichtert das Erzeugen einer Reihe sinnvoller Scanlines, die eine hohe Anzahl an Trennflächen durchqueren.
3. Die **Größe** der Trennflächen wird am Beispiel eines Steinbruchs bei **Rockenau** ermittelt. Insgesamt 4 Trennflächenscharen (3 Kluftscharen) treten in dem Gestein hervor. Aufgrund seiner Größe, des starken Reliefs und der wahrnehmbaren Unterschiede in der Kluftflächengröße aller 3 Scharen ist dieser Steinbruch ein geeigneter Kandidat zur Untersuchung der Flächengrößen.
4. Zuletzt wird ein komplettes **Discrete-Fracture-Network Modell** eines Aufschlusses erzeugt. Dazu wird ein Steinbruch bei **Eberstadt** gewählt. Innerhalb dieses Steinbruchs befindet sich ein fast isoliert stehender Gesteinskörper, der nahezu die Form eines Zylinders aufweist. Dies erlaubt eine Quantifizierung der Trennflächenparameter rund um diese - in fast alle Raumrichtungen aufgeschlossene - Wand. So werden jegliche Trennflächenvariationen optimal erfasst. Alle genannten Methoden können an diesem Beispiel durchgeführt werden. Zudem liegt in diesem Steinbruch ein lithologischer Wechsel in der Vertikalen vor, so dass sich möglicherweise Variationen in den quantifizierten Parametern in Abhängigkeit zur Lithologie feststellen lassen.
5. Die **Rauigkeit** wird ebenfalls am **Römersteinbruch** exemplarisch in Kapitel 8.3 erläutert. Hierbei wird keine direkte Eignung vorausgesetzt, sondern lediglich eine nicht alterierte und verwitterte Kluftoberfläche gewählt, um die Rauigkeit zu quantifizieren.

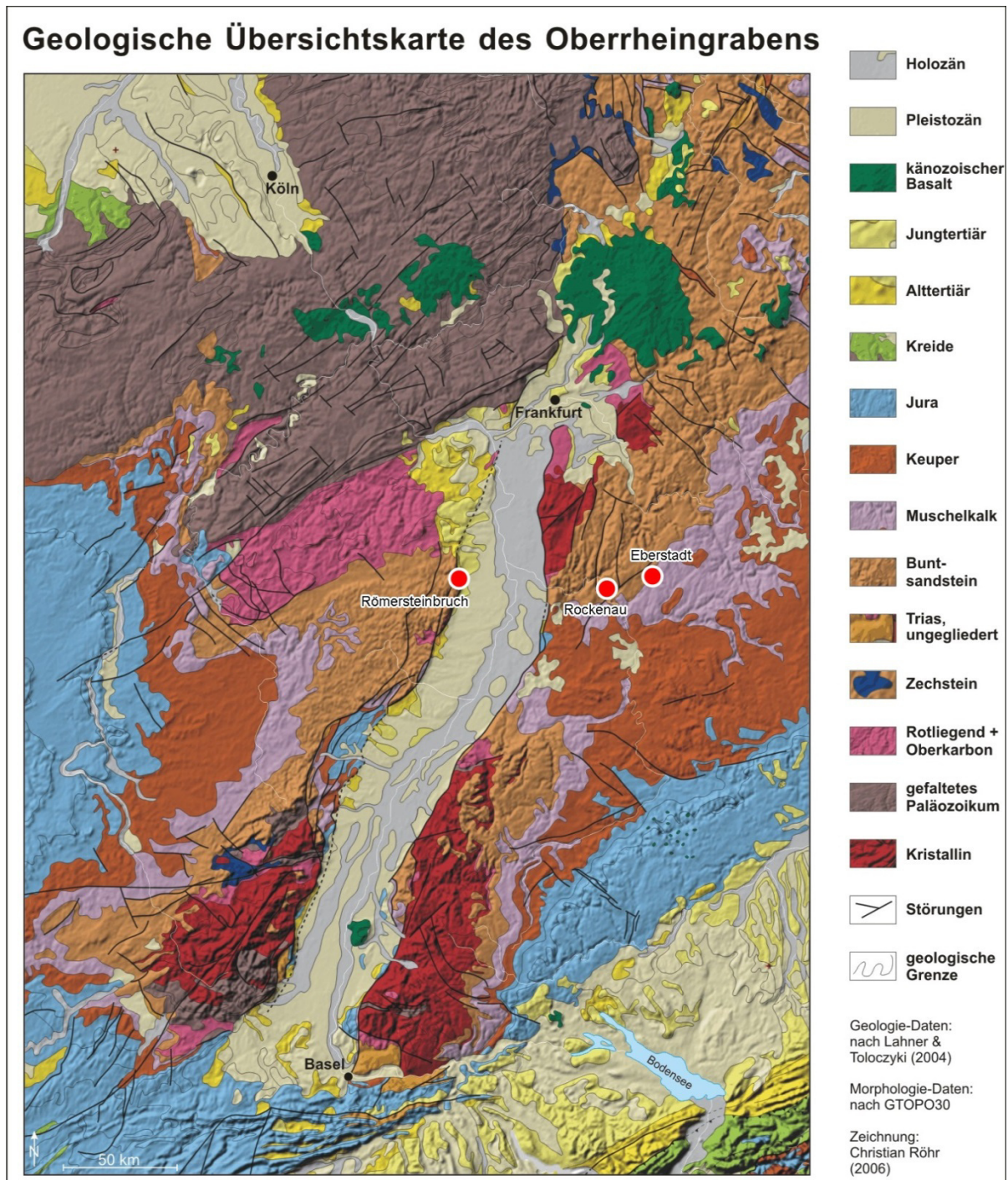
Tabelle 4.1 Zusammenfassung der gewählten Aufschlussbeispiele zur Bestimmung der Trennflächenparameter und der Erstellung eines DFN Modells.

Trennflächenparameter	Aufschluss
<b>Raumlage</b>	Römersteinbruch
<b>Intensität</b>	Römersteinbruch
<b>Größe</b>	Rockenau
<b>DFN Modell</b>	Eberstadt
<b>Rauigkeit</b>	Römersteinbruch



## 4.1 Übersicht und Geologie der Aufschlüsse

Die ausgewählten 3 Aufschlüsse liegen westlich und östlich des Oberrheingrabens in Südwestdeutschland (Abbildung 4.1). Bei allen 3 Aufschlüssen handelt es sich um Gesteine aus der Trias, genauer aus dem Buntsandstein und Muschelkalk. Sie stellen Analoge zu Reservoirgesteinen im Oberrheingraben dar (Referat Energieressourcen Erdöl und Erdgas 2013, Bär 2012, Aretz 2016, Wenke et al. 2011, Grimm et al. 2011, Jodocy und Stober 2011). Zudem werden sie aufgrund ihrer Eignung für die kommenden Fragestellungen ausgewählt und stellen aufgrund ihrer Oberflächenstruktur gute Beispiele für die Aufnahme durch terrestrisches Laserscanning dar.

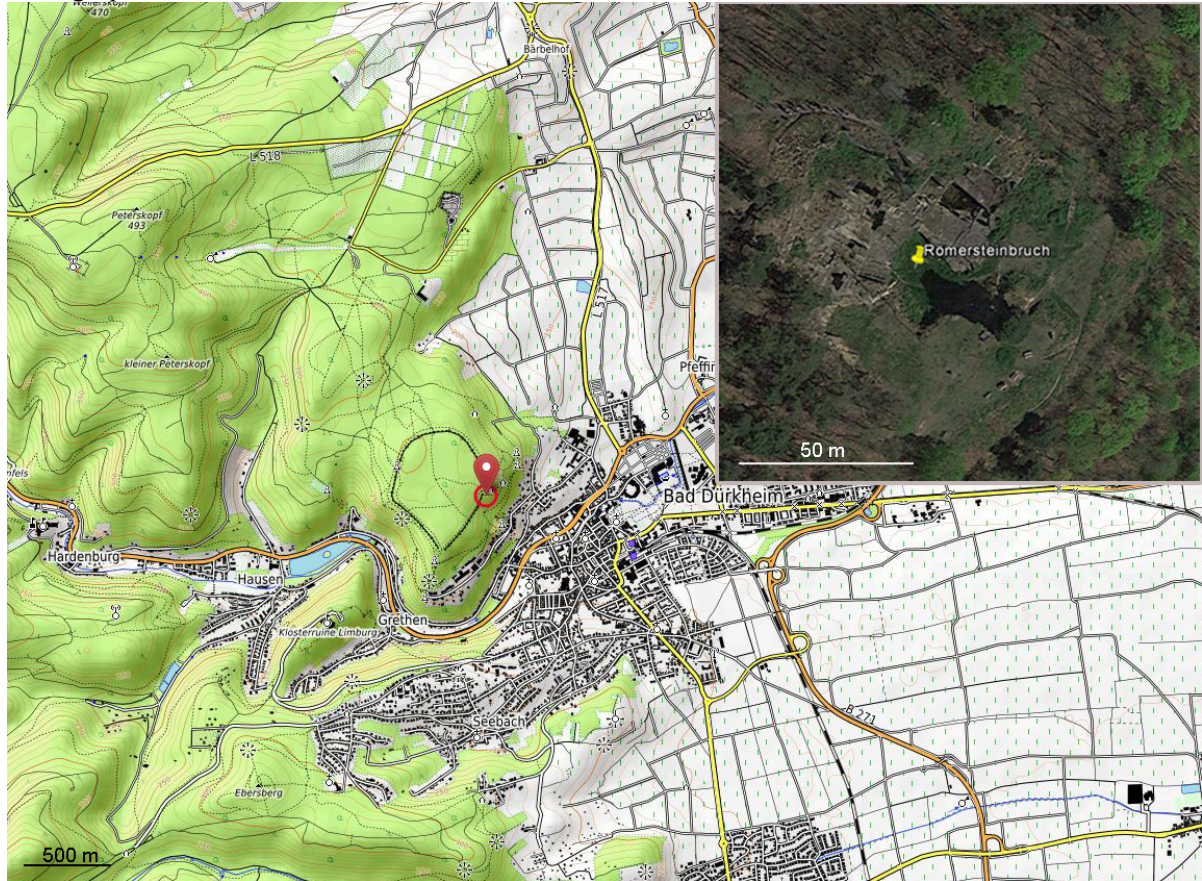


**Abbildung 4.1** Geologische Karte des Oberrheingrabens. Die untersuchten Aufschlüsse befinden sich sowohl westlich als auch östlich des Oberrheingrabens und sind in die Trias (Buntsandstein und Muschelkalk) eingeordnet (Karte nach Dr. Christian Röhr 2006).



### 4.1.1 Römersteinbruch

Dieser Aufschluss ist ein ehemaliger römischer Steinbruch und wird deshalb in dieser Arbeit als „Römersteinbruch“ betitelt. Er liegt am Rand des Pfälzer Walds an der westlichen Grenze des Oberrheingrabens etwa 1 km nördlich der Stadt Bad Dürkheim (RW: 3439176, HW: 5481139). Stratigraphisch ist er im Mittleren Buntsandstein einzuordnen.



**Abbildung 4.2** Topographische Übersichtskarte des Römersteinbruchs (rote Markierung) und zugehöriges Satellitenbild (*Topographische Karte*: Kartendaten ©OpenStreetMap-Mitwirkende, SRTM| Kartendarstellung ©OpenTopoMap (CC-BY-SA), *Satellitenbild*: ©2016 Google, ©2009 GeoBasis-DE/BKG, Aufnahmedatum 19.4.2015).

Die Gesteine sind den oberen Karlstal-Schichten zuzuordnen (Abbildung 4.13). Es handelt sich um mittelkörnigen, quarzitäen Sandstein hoher Festigkeit (Konzan 2015). Dieser weist eine horizontale Schichtung und 2 orthogonal zueinander stehende Trennflächenscharen auf. Die Sandsteine sind stark ausgebleicht und weisen heute eine grau-gelbe Färbung auf. Stellenweise ist eindeutig eine Schrägschichtung erkennbar, die an den Schichtflächen terminiert.





Abbildung 4.3 Fotoaufnahme des Römersteinbruchs (Aufnahme Dennis Laux, 2012).



Abbildung 4.4 Bereinigte Punktwolke des Römersteinbruchs. Vier verschiedene Aufstellpositionen sind für die Erstellung des Modells notwendig.

Zur vollständigen Erfassung des Steinbruchs sind 4 Aufstellpositionen notwendig (Abbildung 4.5). Die Wände werden aus geringer Entfernung aufgenommen und weisen eine hohe Punktdichte auf, wodurch ein Modell hoher Genauigkeit gewährleistet ist und auch feine Abbauspuren erkennbar sind. Eine detaillierte Auflistung der einzelnen Scans und der Merkmale der resultierenden Punktwolke findet sich in Tabelle 4.2.

**Tabelle 4.2** Detaillierte Angaben zur durchschnittlichen Aufstellentfernung, Anzahl erzeugter Punkte und gewählten Winkelincrements am Laserscanner der Scanpositionen 1-4 im Römersteinbruch. Die daraus resultierende

Punktwolke, die sich aus den 4 Punktwolken zusammensetzt, wird bereinigt und die Punktzahl reduziert (über eine Octreefilterung), um eine problemlose Weiterverarbeitung zu gewährleisten. Hier erfolgt eine Auflösungsangabe über den durchschnittlichen Punktabstand.

	Scan 1	Scan 2	Scan 3	Scan 4	Zusammengefügt e Punktwolke
<b>Durchschnittliche Entfernung (geschätzt)</b>	41m	14m	27m	27m	
<b>Anzahl Punkte</b>	15.599.393	16.721.814	12.686.295	15.121.855	16.492.711
<b>Winkelinkrement an Scanner</b>	0,03°	0,04°	0,03°	0,03°	
<b>Anmerkungen</b>	An der Westflanke aufgenommen, orthogonal zur Aufschlusswand ausgerichtet.	Innerhalb des Aufschlusses aufgenommen.	Oberhalb des Aufschlusses gen Norden aufgenommen.	Oberhalb des Aufschlusses gen Süden aufgenommen	Kombination aller 4 Scans zuzüglich Filterung der Vegetation und Anwendung eines Octree-Filters.
<b>Durchschnittlicher Punktabstand</b>	0,008m				

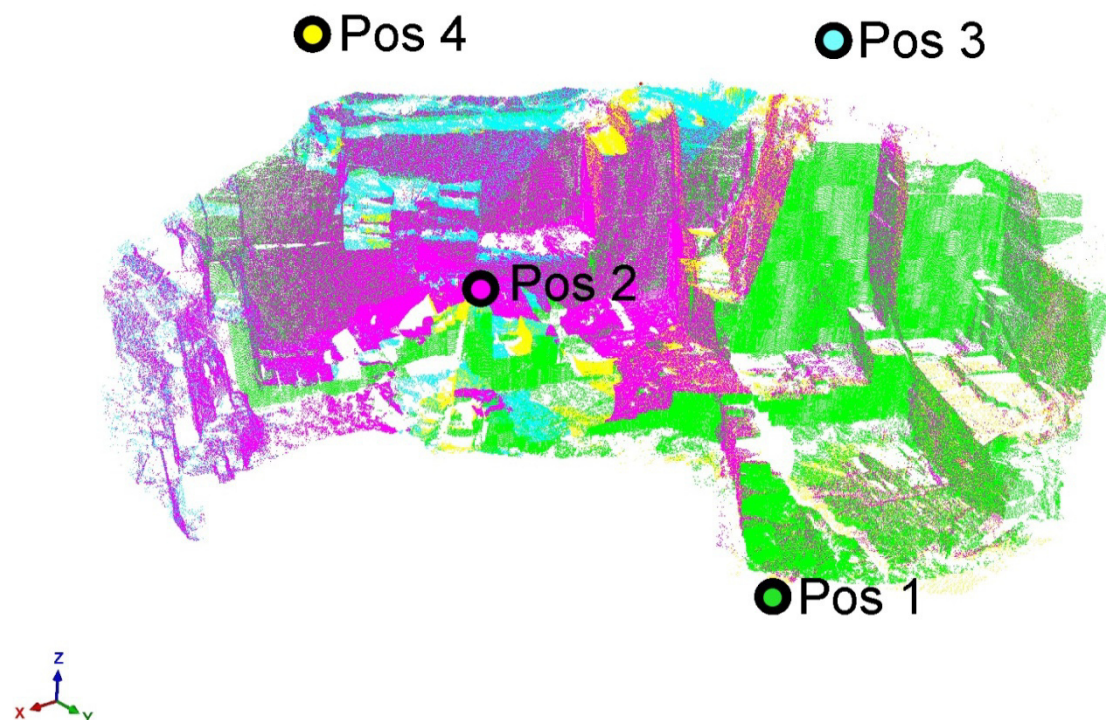


Abbildung 4.5 Farbige Darstellung der 4 aufgenommenen Punktwolken von 4 Scanpositionen aus. Die farbigen Punktwolken zeigen, wie Bereiche im Steinbruch von unterschiedlichen Positionen aus abgedeckt werden und wo große Überlappungen bestehen (Position 1=grün, Position 2=pink, Position 3=türkis und Position 4=gelb).



### 4.1.2 Rockenau

Der Aufschluss liegt südlich von Eberbach-Rockenau am Neckar in Baden-Württemberg. Es ist ein derzeit noch aktiver Steinbruch mit den Ausmaßen von 60 x 30 m. Dieser liegt etwa 35 km östlich von Heidelberg und direkt südlich der Kleinstadt Eberbach (RW: 3499978, HW: 5478023).



**Abbildung 4.6** Topographische Übersichtskarte des Steinbruchs Rockenau (rote Markierung) und zugehöriges Satellitenbild (*Topographische Karte*: Kartendaten ©OpenStreetMap-Mitwirkende, SRTM| Kartendarstellung ©OpenTopoMap (CC-BY-SA), *Satellitenbild*: ©2016 Google, ©2009 GeoBasis-DE/BKG, Aufnahmedatum 24.4.2015).

Er ist gekennzeichnet durch eine deutliche Bankung im Meterbereich. Es handelt sich hier um den Neckartäler Sandstein, eine Wechsellagerung aus roten Sandsteinen und tonigen Lagen, die stratigraphisch dem Unteren Bausandstein des Unteren Buntsandsteins zugeordnet wird (Abbildung 4.13). Die Sandsteine arid-fluviatiler Fazies sind mittelkörnig, blass-rot und weisen zum Hangenden einen erhöhten Tonanteil auf, was sich in einer verringerten Festigkeit der Gesteine widerspiegelt.

Neben der sehr deutlichen, fast horizontalen Schichtung, sind 3 wichtige, fast saiger stehende, Kluftscharen aufgeschlossen und werden gemäß ihrer Einfallsrichtungen benannt. Eine Schar nach NE-SW, eine nach WNW-ESE und schlussendlich eine nach NW-SE einfallende Schar.





Abbildung 4.7 Fotoaufnahme des Steinbruchs bei Eberbach-Rockenau (Aufnahme mit auf Riegl VZ400 montierter NikonD700 am 30.09.2013).



Abbildung 4.8 Bereinigte Punktwolke des Steinbruchs Rockenau.

## Aufschlussanaloge

Tabelle 4.3 Detaillierte Angaben zur durchschnittlichen Aufstellentfernung, Anzahl erzeugter Punkte und gewählten Winkelinkrements am Laserscanner der Scanpositionen 1-6 im Steinbruch Rockenau. Die daraus resultierende Punktwolke, die sich aus den 6 Punktwolken zusammensetzt, wird bereinigt und die Punktzahl reduziert (über eine Octreefilterung), um eine problemlose Weiterverarbeitung zu gewährleisten. Hier erfolgt eine Auflösungsangabe über den durchschnittlichen Punktabstand.

	Scan 1	Scan 2	Scan 3	Scan 4	Scan 5	Scan 6	Zusammengefügte Punktwolke
<b>Durchschnittliche Entfernung (geschätzt)</b>	10m	10m	15m	10m	10m	30m	
<b>Anzahl Punkte</b>	$10^7$	$10^7$	$10^7$	$10^7$	$10^7$	$10^7$	16.492.711
<b>Winkelinkrement an Scanner</b>	0,06°	0,06°	0,06°	0,06°	0,06°	0,06°	
<b>Anmerkungen</b>						Unterhalb des Aufschlusses aufgenommen	Kombination aller 6 Scans zuzüglich Filterung der Vegetation und Anwendung eines Octree-Filters.
<b>Durchschnittlicher Punktabstand</b>							0,1m

### 4.1.3 Eberstadt

Für die Erstellung eines kompletten Reservoirmodells aus Trennflächenparametern wird der Steinbruch Eberstadt gewählt. Dieser Aufschluss ist gekennzeichnet durch eine Abfolge karbonatischer Gesteine und liegt in Baden-Württemberg nahe des Dorfes Eberstadt und der Stadt Buchen (Odenwald) (RW: 3525221, HW: 5483466).

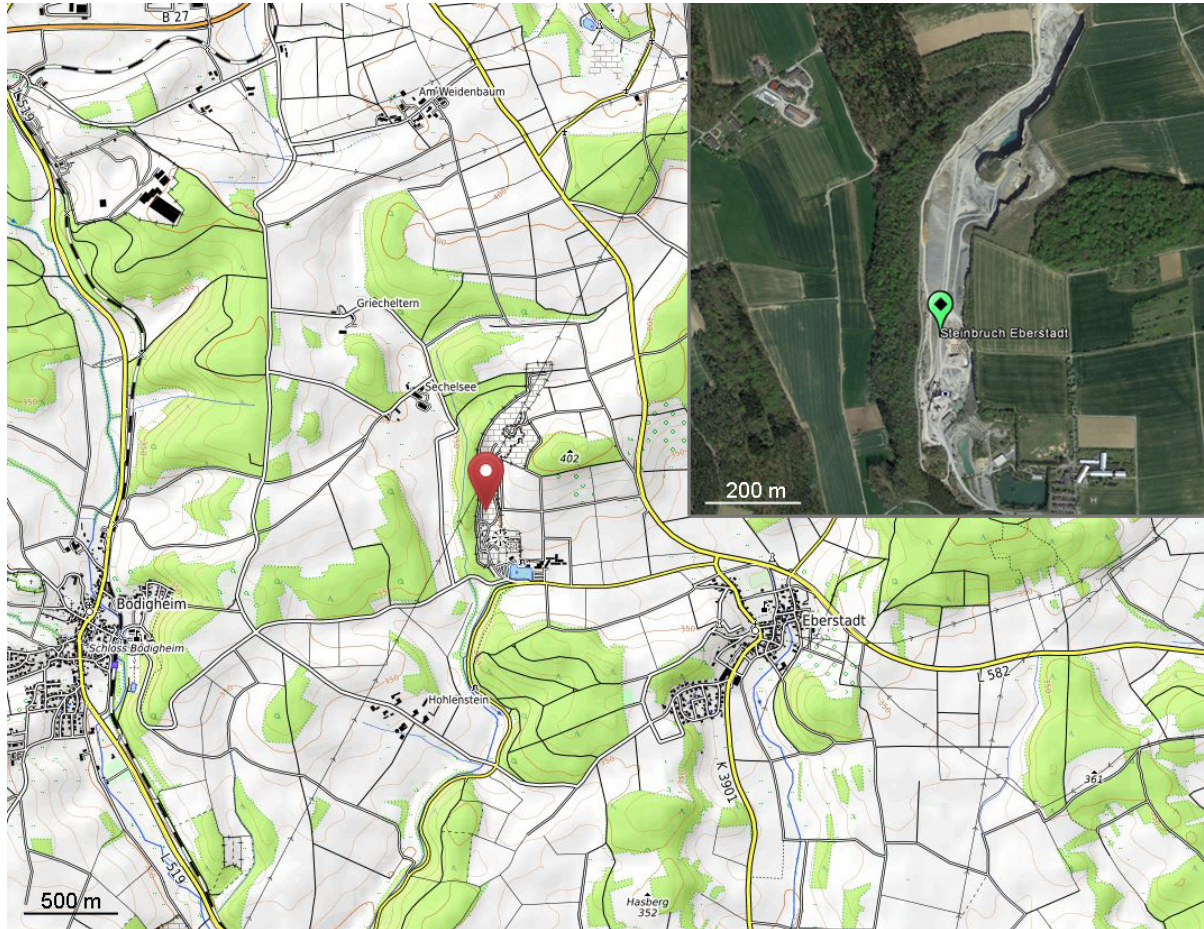


Abbildung 4.9 Topographische Übersichtskarte des Steinbruchs Eberstadt (rote Markierung) und zugehöriges Satellitenbild (*Topographische Karte*: Kartendaten ©OpenStreetMap-Mitwirkende, SRTM| Kartendarstellung ©OpenTopoMap (CC-BY-SA), *Satellitenbild*: ©2016 Google, ©2009 GeoBasis-DE/BKG, Aufnahmedatum 24.4.2015).

Stratigraphisch wird er in der Trias dem Unteren und Mittleren Muschelkalk zugordnet. Der Aufschluss ist ein sehr gutes Beispiel einer fast 360° exponierten Aufschlusswand. Ziel innerhalb dieses Steinbruchs ist nämlich ein 75\*115 Meter großer Gesteinskörper zylindrischer Form innerhalb des Steinbruchs, dessen Aufschlusswand ca. 270° aufgeschlossen ist (Abbildung 4.10).

Insgesamt werden 7 Scanpositionen rund um den Zylinder gewählt, um diesen komplett abzubilden (Abbildung 4.11). Details der Aufnahmen finden sich in Tabelle 4.4.





Abbildung 4.10 Gesteinszylinder innerhalb des Steinbruchs Eberstadt, der als Zielobjekt für die Laserscankampagne ausgewählt wird (Foto: Dennis Laux, 2012).

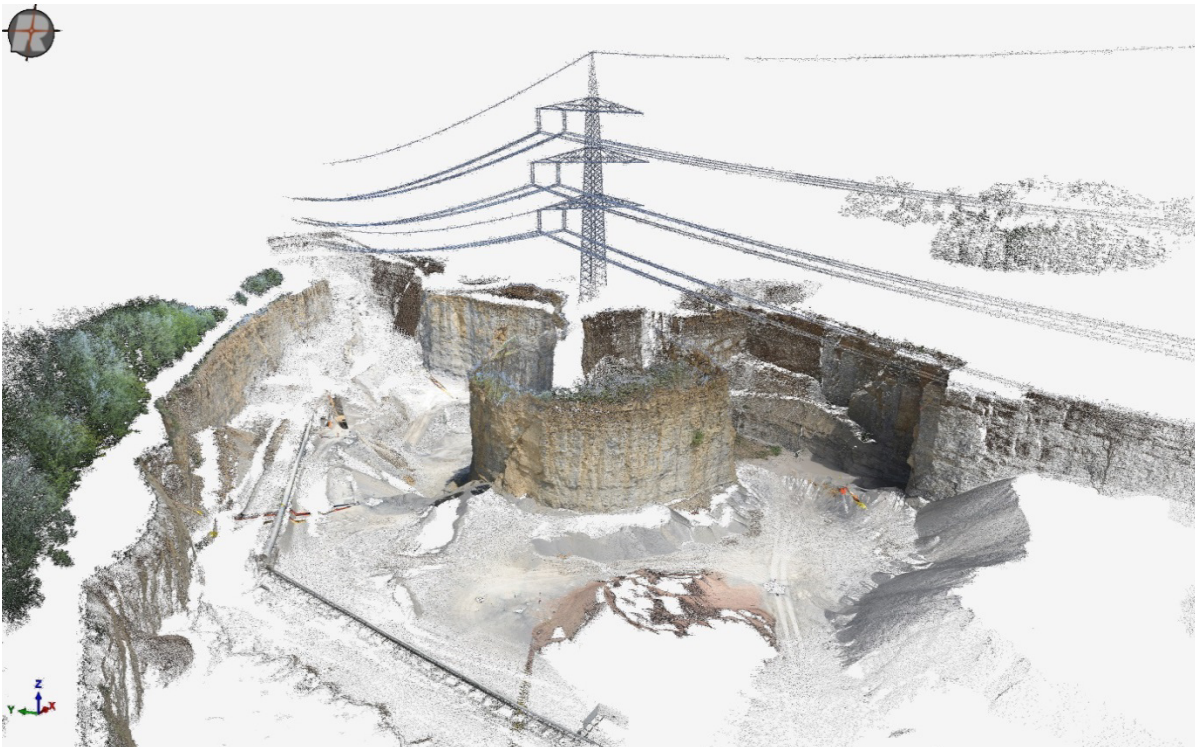


Abbildung 4.11 Punktwolkenmodell des Steinbruchs mit dem zylindrischen Zielobjekt in der Mitte. Es handelt sich hierbei um die Zusammensetzung aus allen 7 Scans, die noch keiner Bereinigung unterzogen sind.



Das Arbeitsgebiet ist Teil des Muschelkalks der Mittleren Trias. Die Fazies ist marin und die Gestein hauptsächlich aus Kalzit und Dolomit aufgebaut. Innerhalb des Steinbruchs finden sich sowohl Formationen des Unteren als auch des Mittleren Muschelkalk (Abbildung 4.12 und Abbildung 4.13). Der Muschelkalk erstreckt sich über eine Mächtigkeit von mehr als 27 Metern und umfasst die Jena-Formation (Unterer Muschelkalk) und der Kalkstadt-Formation (Geislingen Formation des Mittleren Muschelkalks) (Hagdorn und Simon 2005; Geyer 2002). Die obere Spiriferina-Formation ist die niedrigste aufgeschlossene Formation, weist nur eine Mächtigkeit von 5-15 cm auf und ist ein Kalkstein mit hohem Muschelanteil. Die Jena-Formation baut sich aus Wellenkalken auf. Zwei oolithische Kalksteine (Schaumkalkbank) durchziehen die Jena-Formation. Die obere Geislingen-Formation ist durch eine Wechsellagerung dolomitischer Kalksteine und toniger Mergel gekennzeichnet. Der Aufschluss liegt an der nördlichen Flanke des NE-SW streichenden Baulandgraben. Dieser Baulandgraben ist Teil eines süd-ost-gekippten Störungsblocksystems, der Süddeutschen Schichtstufenlandschaft (Gwinner 1986). Eine Abschiebung durchschlägt den Gesteinszylinder (Abbildung 4.12). Diese wird ebenfalls im späteren Verlauf bei der Erstellung des Reservoirmodells berücksichtigt.

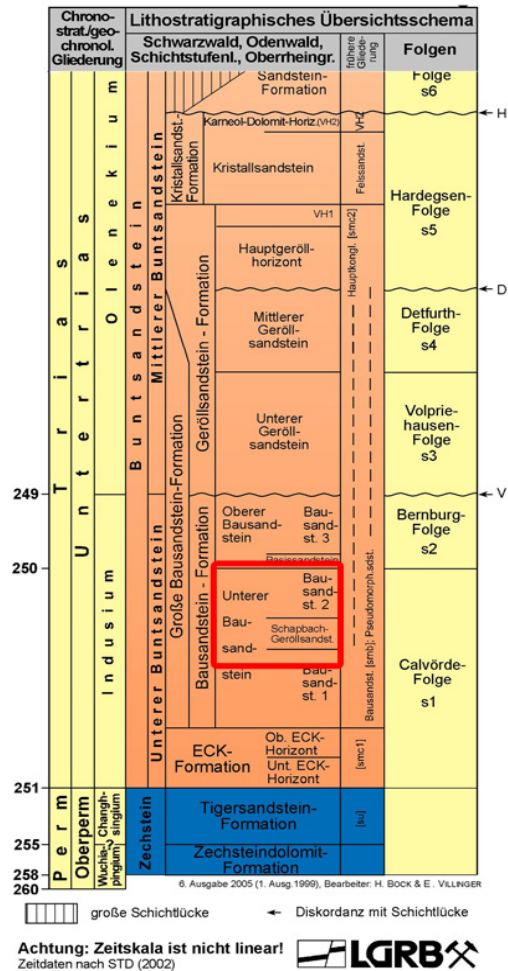


**Abbildung 4.12** Dreidimensionale Darstellung der bereinigten Punktwolke des Steinbruchs Eberstadt. Passend dazu ist die lithologische und stratigraphische Abfolge rechts dargestellt. Zudem ist eine deutlich erkennbare Abschiebung gekennzeichnet (rot). Der Untere Muschelkalk besteht aus welligen Kalken (Wellenkalk ist zweimal durch eine oolithische Formation durchzogen (Schaumkalkbank)). Der Mittlere Muschelkalk im Hangenden ist durch dolomitische Kalksteine und Mergel charakterisiert (Hagdorn und Simon 2005).

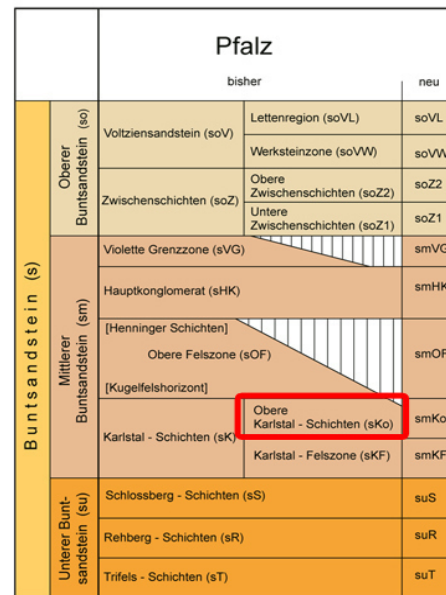
Tabelle 4.4 Detaillierte Angaben zur durchschnittlichen Aufstellentfernung, Anzahl erzeugter Punkte und gewählten Winkelinkrements am Laserscanner der Scanpositionen 1-7. Die daraus resultierende Punktwolke, die sich aus den 7 Punktwolken zusammensetzt, wurde bereinigt und die Punktzahl reduziert (über einen Octree-Filter), um eine problemlose Weiterverarbeitung zu gewährleisten. Hier erfolgt eine Auflösungsangabe über den durchschnittlichen Punktabstand.

	Scan 1	Scan 2	Scan 3	Scan 4	Scan 5	Scan 6	Scan 7	Zusammengefügte Punktwolke
<b>Durchschnittliche Entfernung (geschätzt)</b>	40 m	40 m	35 m	35 m	35 m	50 m	45 m	
<b>Anzahl Punkte</b>	13.669.396	13.654.755	10.721.414	17.124.496	19.744.700	14.082.557	12.172.153	9.796.425
<b>Winkelinkrement an Scanner</b>	0,02°	0,02°	0,02°	0,02°	0,02°	0,02°	0,02°	
<b>Anmerkungen</b>								Aus Scan 1-7 zusammengefügt und um Vegetation bereinigt. Anwendung Octree-Filter 0,025 m
<b>Durchschnittlicher Punktabstand</b>								0,025 m

## Rockenau



## Römersteinbruch



## Eberstadt

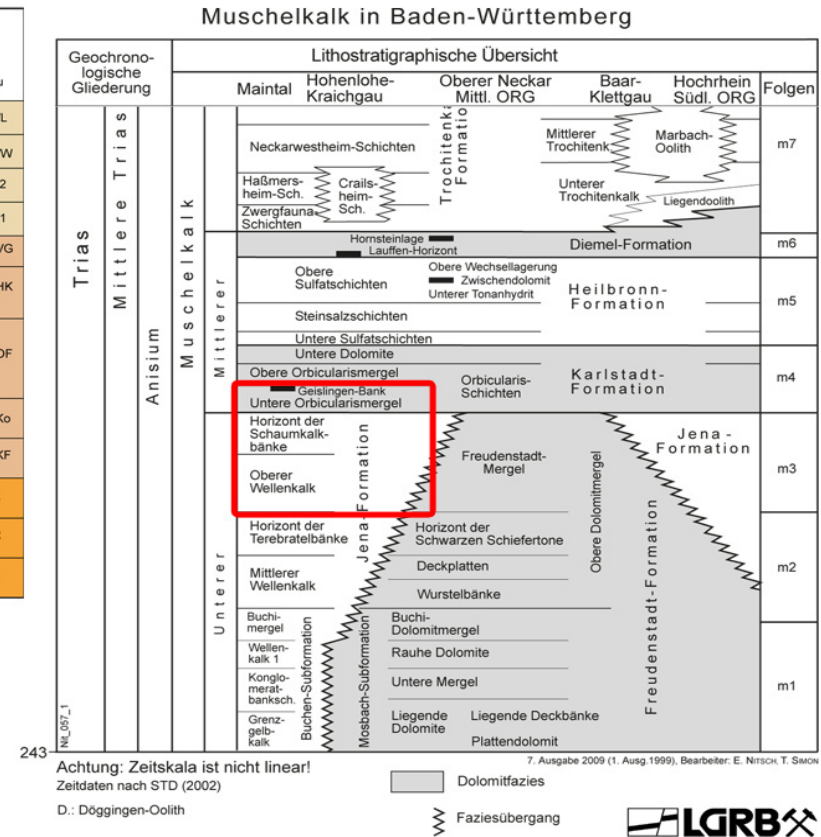


Abbildung 4.14 Stratigraphische Einordnung der 3 Aufschlüsse (rote Markierung). (Verändert nach Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau 2010, Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland Pfalz, Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland Pfalz).

## 5 Methodik

Der erste große Teilabschnitt dieser Arbeit befasst sich mit der Auswertung dreier grundlegender Trennflächenparameter, der Orientierung und Größe der Trennflächen sowie einer Quantifizierung der Häufigkeit von Trennflächen durch die Intensität. Oft wird im Folgenden von Klüften stellvertretend für Trennflächen gesprochen. Klüfte sind hier als äquivalent zu dem englischen Begriff *fractures* zu sehen, um Trennflächen, die nicht Resultat eines Bruches nach den Kriterien aus Kapitel 2.9.2 sind, wie beispielsweise die Schichtung, auszugliedern. Jede Methode wird einzeln in einem Kapitel betrachtet und verschiedene Wege der Bearbeitung beispielhaft an einem Aufschluss aufgezeigt. Jedes Kapitel involviert direkt die Diskussion der Methodik.

Die hier vorgestellten Methoden setzen sich aus Adaptionen klassischer Feldmessungen auf Punktwolken, Automatisierung manueller Auswerteprozesse und eigenen Ideen zusammen. Zunächst wird jeder Trennflächenparameter definiert und dessen Quantifizierung aus Aufschlüssen erläutert. Es folgt ein Abschnitt über den derzeitigen Stand bei der Auswertung der Parameter aus Laserscandaten. Abschließend werden die eigenen, neuen Methoden und Abläufe detailliert aufgeführt.

### 5.1 Orientierung

In der Felsmechanik bei der Beurteilung von Hangstabilitäten oder auch in der Reservoircharakterisierung bei der Beurteilung von Fluidflüssen im Untergrund spielt die Orientierung von Trennflächen eine wichtige Rolle, beispielsweise bei der Erstellung von DFN Modellen (Zhang 2005). Orientierungen von Trennflächen helfen bei der Aufnahme und Beurteilung struktureologischer Fragestellungen, der Ingenieur- und Hydrogeologie und Sedimentologie.

Zwei Methoden werden vorgestellt, mit denen die Auswertung der Orientierung aus Punktwolken möglich ist. Anschließend werden diese miteinander verglichen. Die Methodik wird am Römersteinbruch (s. Kapitel 4.1.1) erprobt. Die Auswertung beruht auf der Ermittlung der Normalvektoren auf der Oberfläche des Aufschlusses. Zwei Softwarepakete kommen hier maßgeblich zum Einsatz, RiSCAN Pro und CloudCompare. Weitere, auf den Normalvektoren beruhende, Berechnungen werden mit R und Excel durchgeführt.

#### **Berechnung der Orientierungen aus Normalvektoren**

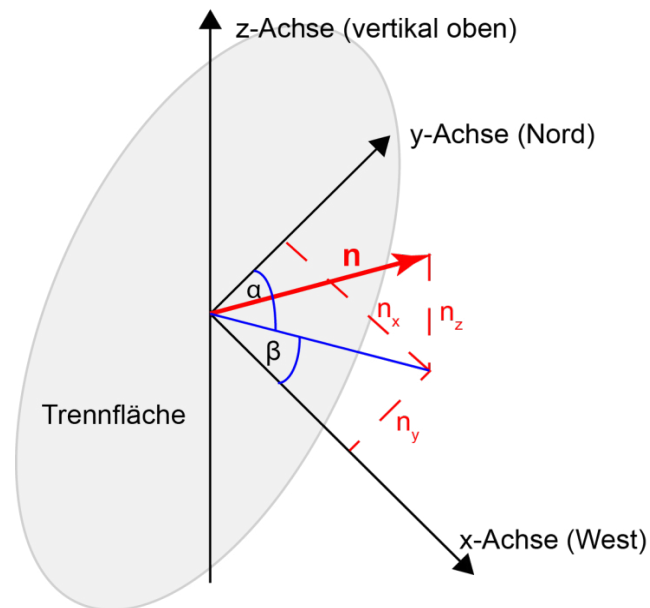
Die Orientierung von Flächen im Raum basiert auf der Auswertung der zugehörigen Normalvektoren der Flächen (Abbildung 5.3). Dieser Normalvektor setzt sich aus den 3 Raumkomponenten zusammen und ist eindeutig definiert über  $n = (n_x/n_y/n_z)$  (siehe Abbildung 5.1). Die Normalvektoren der Flächen sind normiert auf eine einheitliche Länge von 1. Die Orientierungen der Fläche lassen sich einteilen in Einfallsrichtung  $\alpha$  und Einfallswinkel  $\beta$  (Clar 1954). Beide zusammen spiegeln die Raumlage der Fläche eindeutig wider (Abbildung 5.3). Der Einfallswinkel  $\beta$  lässt sich direkt über eine Kosinusfunktion einzig aus der z-Komponente des Normalvektors berechnen, die Einfallsrichtung  $\alpha$  wird über eine Tangensfunktion der x- und y-Komponente berechnet (Ferrero et al. 2009). Es gilt dabei:

$$\beta = \arccos(|n_z|) \quad 5.1$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{n_x}{n_y}\right) \quad 5.2$$

Alternativ kann der Einfallswinkel ebenfalls über eine Tangensfunktion berechnet werden.

$$\beta = -\arctan \operatorname{sgn}(n_z) \frac{n_z}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2}} + 90^\circ \quad 5.3$$



**Abbildung 5.1** Darstellung der einzelnen Komponenten des Normalvektors  $n$  und der daraus resultierenden Einfallsrichtung  $\alpha$  und des Einfallswinkels  $\beta$  auf einer Trennfläche (nach Zhang 2005).

Allgemein ist eine Tangensfunktion nur für einen Wertebereich von  $-90^\circ$  bis  $+90^\circ$  definiert. Während dieser Bereich für den Einfallswinkel zwischen  $0$  und  $90^\circ$  ausreichend ist, wird für die Einfallsrichtung eine Angabe zwischen  $0^\circ$  und  $360^\circ$  benötigt. So muss bei der Berechnung der Einfallsrichtung eine Korrektur des berechneten Wertes erfolgen. Diese Korrektur basiert in erster Linie auf der Festlegung, in welchem Oktanten des Koordinatensystems der zugehörige Normalvektor  $n$  liegt. Hierbei unterscheidet man zwischen den vier oberen Oktanten I, II, III, IV mit positivem  $n_z$  und den vier unteren Oktanten V, VI, VII, und VIII (Abbildung 5.2). Nur die  $n_z$  Komponente bestimmt, ob der Normalvektor im oberen oder unteren Oktanten liegt. Zur Berechnung des Einfallswinkels werden zunächst nur die  $n_x$  und  $n_y$  Vektorkomponenten betrachtet. Die Berechnung erfolgt im ersten Schritt unabhängig von deren Zugehörigkeit zu einem der Oktanten. Aufgrund der Vorzeichen der Komponenten  $n_x$  und  $n_y$  sind die berechneten Winkel der Oktanten II/VI und IV/VIII stets negativ und für I/V und III/VII positiv, der absolute Zahlenwert bleibt aber gleich. Zur Vereinfachung betrachten wir zunächst nur den oberen Bereich der Oktanten I, II, III und IV. Die Berechnungen gelten analog auch für Oktanten V, VI, VII und VIII. Je nach Kombination aus positiven und negativen  $n_x$  und  $n_y$  berechnen wir unterschiedliche  $\alpha$  ( $\alpha_1$ -  $\alpha_4$ ). Nur im Falle von  $\alpha_1$  entspricht dann der berechnete Winkelwert der Einfallsrichtung im dreidimensionalen Raum. Für die übrigen 3 Fälle muss noch eine Anpassung vorgenommen werden. Die Umrechnungen dazu sind in Tabelle 5.1 aufgeführt und gelten, wie bereits erwähnt, analog für die Oktanten V bis VIII.

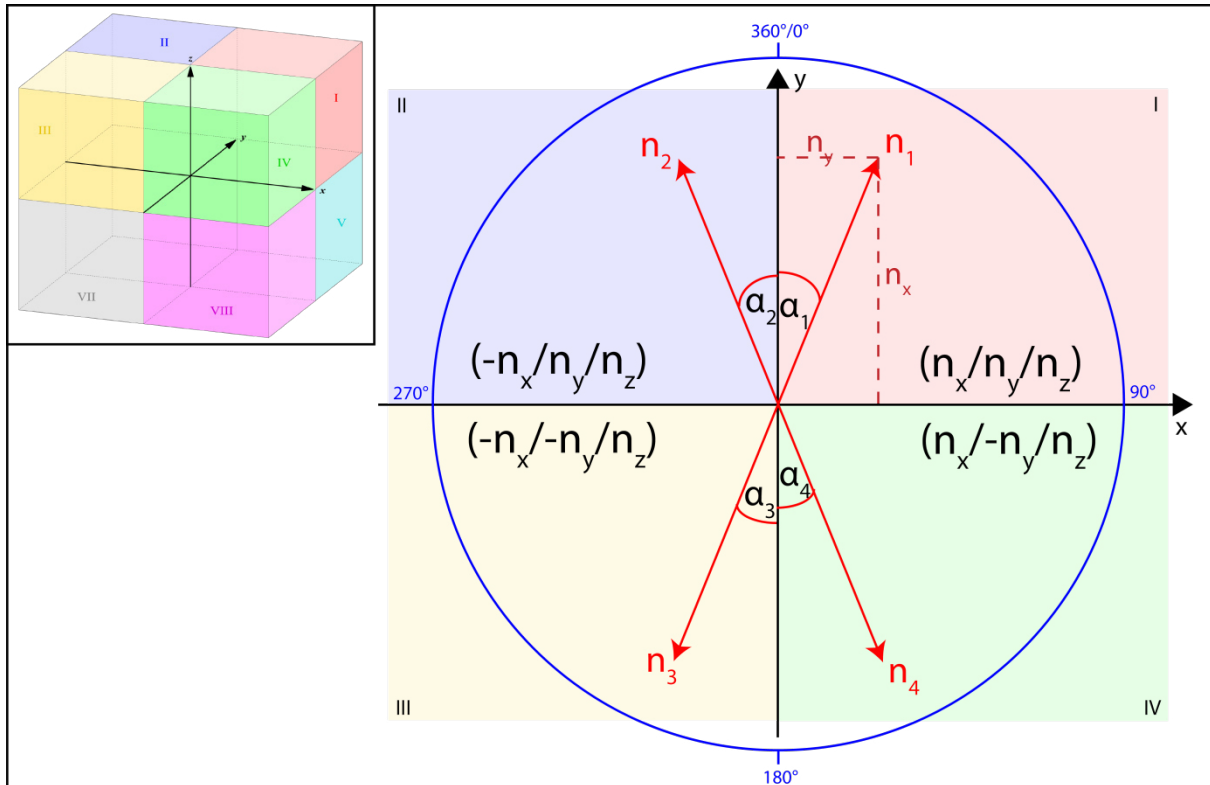


Abbildung 5.2 Einteilung des 3D Raumes in seine 8 Oktanten (oben links) für die unterschiedliche Bedingungen bei der Orientierungsberechnung aus Normalvektoren gelten. Die unterschiedlichen Voraussetzungen der oberen 4 Oktanten sind (rechts) detailliert dargestellt.

Anschließend erfolgt eine nochmalige Differenzierung für die Vektorkomponente  $n_z$ . Diese ist zunächst bei der Berechnung der Einfallsrichtung unberücksichtigt und bestimmt nun, ob wir uns im oberen Oktantenbereich (I – IV) oder im unteren Bereich (V- VIII) befinden. Die Komponente  $n_z$  beschreibt hierbei, ob der Normalvektor in eine Richtung ober- oder unterhalb der Horizontalen gerichtet ist. Für den Fall, dass  $n_z$  negativ ist, zeigt der Normalvektor nicht die Einfallsrichtung der Fläche an, sondern spiegelt die Orientierung der Rückseite der Fläche wider. Diese entspräche der Kipprichtung der Fläche. Um nur wahre Einfallsrichtungen der Flächen zu erhalten, werden berechnete Einfallsrichtungen aus Normalvektoren mit negativer  $n_z$ -Komponente um einen Winkel von  $180^\circ$  korrigiert.

Tabelle 5.1 Formeln zur Berechnung des wahren Einfallswinkels  $\alpha$  in Abhängigkeit seiner Lage im Koordinatensystem.

Oktant	Berechneter Einfallswinkel	Wahrer Einfallswinkel $\alpha$
I	$\alpha_1$	$\alpha_1$
II	$\alpha_2$	$360^\circ -  \alpha_2 $
III	$\alpha_3$	$180^\circ + \alpha_3$
IV	$\alpha_4$	$180^\circ -  \alpha_4 $

Beispiel:

Gegeben ist ein Vektor mit den Koordinaten  $n = (-0,2/0,5/-0,84)$ . Zunächst wird der Einfallswinkel  $\beta$  berechnet:

$$\beta = \cos(|-0,7|) \approx 33^\circ$$

Da  $n_x < 0$ , greift die Bedingung für Oktant II. Der zugehörige Wert für  $\alpha$  berechnet sich nun über:

$$\alpha_3 = \arctan\left(-\frac{0,2}{0,5}\right) \approx -22^\circ$$

$$\alpha = 180^\circ + \alpha_3 \approx 338^\circ.$$



Für den Vektor mit den Koordinaten ergibt sich eine Einfallsrichtung und ein Einfallswinkel von  $338^\circ/33^\circ$ .



Abbildung 5.3 Orientierung des Normalvektors (rechts) einer Fläche und Definition des Einfallswinkel  $\beta$  und der Einfallsrichtung  $\alpha$  (links). Jede Fläche ist eindeutig durch 2 Normalvektoren definiert (durchgezogener und gestrichelter Pfeil). Hierbei gilt es die Einfallsrichtung (durchgezogen) von der Kipprichtung (gestrichelt) zu trennen.

Die Berechnungen werden automatisch durch ein in „R“ geschriebenes Skript durchgeführt und laufen völlig autonom (siehe Anhang 0).

### ***Orientierung aus der Punktwolke***

Im folgenden Kapitel werden unterschiedliche Methoden zur Auswertung der Raumlage von Kluftflächen aus Punktwolken vorgestellt. Die Analyse und Auswertung der Flächen basiert auf der Berechnung der entsprechenden Normalvektoren dieser Flächen. Man unterscheidet dabei Methoden, die entweder direkt auf die Punktwolke angewendet werden oder im Voraus eine Triangulation (das Erstellen eines „Mesh“) der Punktwolke erfordern. Eine weitere Unterscheidung wird dadurch getroffen, ob die Orientierung einzelner oder mehrerer zusammengefasster Punkte ausgewertet werden soll.

1. Punktweise Auswertung: Die Orientierung jedes einzelnen Punktes in der Punktwolke oder jedes Dreieckes einer triangulierten Oberfläche wird berechnet.
2. Multi-Punkt Auswertung: Die Normalvektoren zu Flächen werden berechnet, die aus mehreren zusammenhängenden Punkten oder Dreiecken konstruiert sind.

Die Orientierung einzelner Punkte in der Punktwolke erfolgt über eine Eigenwertanalyse der Kovarianzmatrix einer lokalen Gruppe von Punkten (COLTOP 3D: A software dedicated to analyze relief using large DEM and massive 3D-imaging cloud points 2008, Jaboyedoff et al. 2008, 2012). Alternativ wird statt einzelner Punkte eine triangulierte Punktwolke genutzt und die Raumlage jedes einzelnen Dreiecks über eine K-fuzzy Methode berechnet (Slob et al. 2005). Diese Ansätze führen zu einer großen Dichte an Daten, da die 3D Modelle aus vielen Millionen Punkten oder Dreiecken bestehen können. Die darauffolgende Auswertung und Interpretation der Orientierung erfordert daher einen zeitintensiven Rechenaufwand und verkompliziert die Bestimmung eindeutiger Resultate. Erschwerend kommt hinzu, dass nicht nur die Orientierungen einzelner Flächen in die Berechnungen fließen, sondern auch die Orientierungen aller Strukturen der gescannten Oberfläche des Aufschlusses. So werden Ecken und Kanten sowie kleine Unebenheiten auf Kluftflächen mit in die Ergebnisse übernommen. Diese Werte überlagern die Orientierung der reinen Kluftflächen, dessen Auswertung das eigentliche Ziel darstellt, und erschweren somit den Auswerteprozess. Bei der Quantifizierung der Rauigkeit einzelner Flächen beispielsweise ist dieser Ansatz jedoch sehr wirkungsvoll (Sturzenegger und Stead 2009b).

Die Multi-Punkt Auswertung, bei der mehrere Punkte oder Dreiecke zu Flächen zusammengefügt werden, um einen Orientierungswert dieser Fläche zu bestimmen, hat sich in den letzten Jahren

bewährt. Die Extrahierung von Flächen aus der Punktwolke kann über Kurvaturkalkulationen (Wilson et al. 2011), manuelles Auswählen bzw. Markieren von Flächen (Haneberg 2008; Gaich et al. 2006) - eine auf einem RANSAC-Algorithmus beruhende Methode zum Extrahieren zusammenhängender Flächen (Ferrero et al. 2009) - oder durch das Zusammenführen benachbarter Dreiecke gleicher Orientierung zu einem Polygon (Kemeny und Donovan 2005) erfolgen. Letztgenannter Ansatz basiert auf einer 2.5D triangulierten „Vermaschung“ und wird durch die Software SplitFX durchgeführt. Dessen Genauigkeit hängt stark von der Qualität der Triangulation ab. Hinzu kommt, dass die Ergebnisse der Orientierungen hierbei teilweise unpräzise sind (Mah et al. 2011). Das manuelle Auswählen von Flächen ist sehr arbeitsintensiv und bei sehr großen Aufschlussmodellen kaum durchführbar. Ein von (Vöge et al. 2013) entwickelter Algorithmus berechnet eine geglättete Vermaschung und fügt benachbarte Dreiecke gleicher Orientierung zu einer repräsentativen Fläche zusammen. Diese Methoden verringern die Anzahl an Daten - verglichen mit der punktwisen Auswertung - erheblich. Kommende Arbeitsschritte werden auf diese Weise deutlich vereinfacht, beispielsweise das Darstellen der Orientierung in einem Stereogramm und die Interpretation des Kluftnetzwerks.

In dieser Dissertation werden zwei Multi-Punkt Auswertungen vorgestellt, geprüft und weiterentwickelt, um eine möglichst automatische Orientierungsauswertung aus Punktwolken zu erhalten. Diese Methode soll möglichst schnell genaue Ergebnisse aus Daten der TLS Messungen liefern. Beide Methoden basieren auf der Punktwolke selbst und setzen keine Triangulation voraus. Somit sind die Methoden unabhängig von Art und Qualität des Triangulationsprozesses. Dadurch ist eine erste Fehlerquelle ausgeschlossen. Die Methoden machen zukünftig das manuelle Auswählen und Interpretieren von Flächen überflüssig.

### 5.1.1 Bestimmung der Orientierung mittels Plane-Patch-Filter

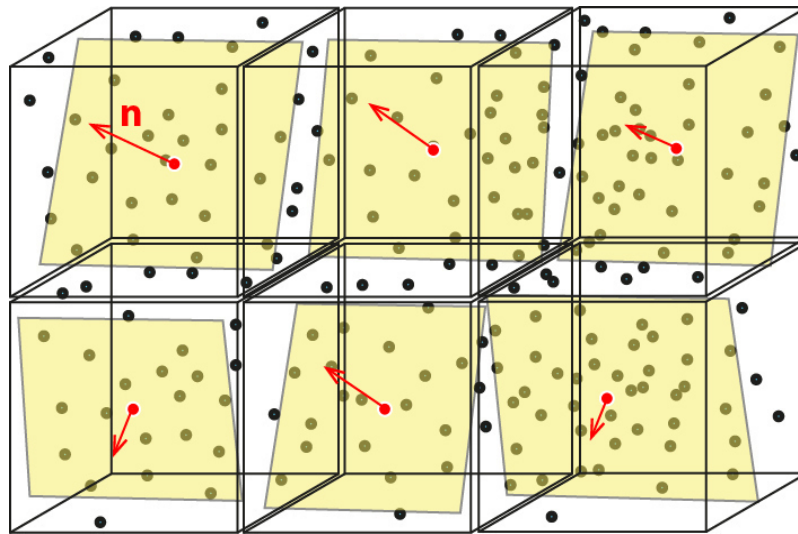
Eine Methode zur Orientierungsauswertung wird vorgestellt, die direkt auf die Punktwolke angewendet werden kann und die Normalvektoren zu Flächen auswertet, die über einen Multi-Punkt Ansatz bestimmt werden. Diese Methode kann auch auf Punktwolken - bestehend aus mehreren Millionen Punktmessungen - angewendet werden. Der Algorithmus zur Identifizierung von Normalvektoren ist in die Software RiSCAN Pro der Firma Riegl integriert (Riegl LMS 2013). Die Bezeichnung dieses Algorithmus oder Filters lautet „*plane patch filter*“. Er wurde ursprünglich entwickelt um ein Übereinanderlegen zweier oder mehr Punktwolken von verschiedenen Scanpositionen durch einen „Iterative closest point“ Algorithmus (ICP) zu gewährleisten, indem er Referenzpunkte bekannter Orientierung erzeugt. Der Algorithmus entwickelt Suchwürfel (*search cubes*), um innerhalb dieser Würfel eine passende Fläche zu detektieren. Die Würfel werden über die komplette Punktwolke homogen und nebeneinandergereiht verteilt. Die Detektion der Flächen beruht dabei auf Punkten innerhalb dieses Würfels, die gemeinsam eine Fläche repräsentieren. Der Vorgang ist durch 3 unterschiedliche Parameter kontrolliert: die *Würfelgröße (cube size)*, *maximaler Flächenfehler (maximum plane error)* und *Mindestanzahl Punkte (minimum number of points)*. Es obliegt dem Anwender diese 3 Kontrollparameter so anzupassen, dass sie den Aufschlussbedingungen gerecht werden und die Flächen fehlerfrei identifiziert werden können.

#### **Arbeitsprozess**

Zunächst wird die gesamte Punktwolke in Würfel konstanter Größe unterteilt (Abbildung 5.4). Die Größe kann dabei aus der Potenzreihe der Zahl 2 gewählt werden, zwischen  $2^4$  und  $2^{18}$  mm. Innerhalb jedes Würfels wird eine Fläche über die Methode der kleinsten Quadrate angepasst. Der erste hier kontrollierende Parameter ist die Standardabweichung der Normalendistanzen zwischen dieser Fläche und allen Punkten. Dieser Parameter ist der *Maximale Flächenfehler (maximum plane error)*. Er wird in Metern angegeben. Zusätzlich wird die *Mindestanzahl an Punkten* festgelegt, die für die Erzeugung der Fläche berücksichtigt werden und auch die Bedingungen der anderen beiden Parameter erfüllen. Das Ergebnis ähnelt Wandfliesen, wobei jede der Fliesen oder Flächenstücke auf der Punktwolkenoberfläche einer Fläche mit einem zugehörigen Normalvektor entspricht, der im Zentrum dieses Flächenstücks liegt. Die Größe der Fliesen wird allein durch die *Größe des Suchwürfels* bestimmt. Das Vorgehen führt dazu, dass Kluftflächenareale größer als der Suchwürfel durch mehrere Flächenstücke und Normalvektoren repräsentiert werden. Zur Kontrolle der berechneten Ergebnisse



durch den Benutzer können die Mittelpunkte und dazugehörigen Normalvektoren direkt in der Punktwolke visualisiert werden (Abbildung 5.5). So kann festgestellt werden, ob relevante Bereiche unberücksichtigt sind eine nicht zuordenbare Oberfläche fälschlicherweise als Kluftfläche identifiziert wird.



**Abbildung 5.4** Skizzierte Arbeitsweise des „Plane Patch Filters“ für die automatische Orientierungsauswertung. Suchwürfel konstanter Größe werden über die Punktwolke (schwarze Punkte) gleichmäßig verteilt. Innerhalb jedes Würfels wird eine möglichst passende Fläche an die Punkte angepasst (gelbe Flächen), immer unter Einbehaltung der beiden Parameter des maximalen Flächenfehlers und der Mindestanzahl der Punkte. Bei Nichterfüllung aller Parameter wird keine Fläche erzeugt. Am Mittelpunkt jeder Fläche wird ein Punkt mit zugehörigem Normalvektor (rot) erzeugt und kann als Wert in eine ASCII-Datei exportiert werden.

Aus resultierenden Normalvektoren - als ASCII-Datei exportiert - werden Einfallsrichtung und -winkel bestimmt, um beispielsweise in Stereogrammen oder als Kluftrosen visualisiert dargestellt zu werden. Bereiche hoher Polpunktdichte im Stereogramm eignen sich zur Identifizierung einer Kluftchar aufgrund ihrer Raumlage. Hierbei ist eine Clusteranalyse sinnvoll und unterstützend. Diese detektiert das Zentrum der Punktakкумуляtion. Polpunktcluster können auch manuell identifiziert werden, gerade dann, wenn die Punktdichte des Clusters gering ist (Kapitel 2.3.1). Die in unterschiedliche Kluftscharen unterteilten Normalvektoren können wieder in der Punktwolke visualisiert und nach ihrer Scharzugehörigkeit eingefärbt dargestellt werden (Abbildung 5.5).

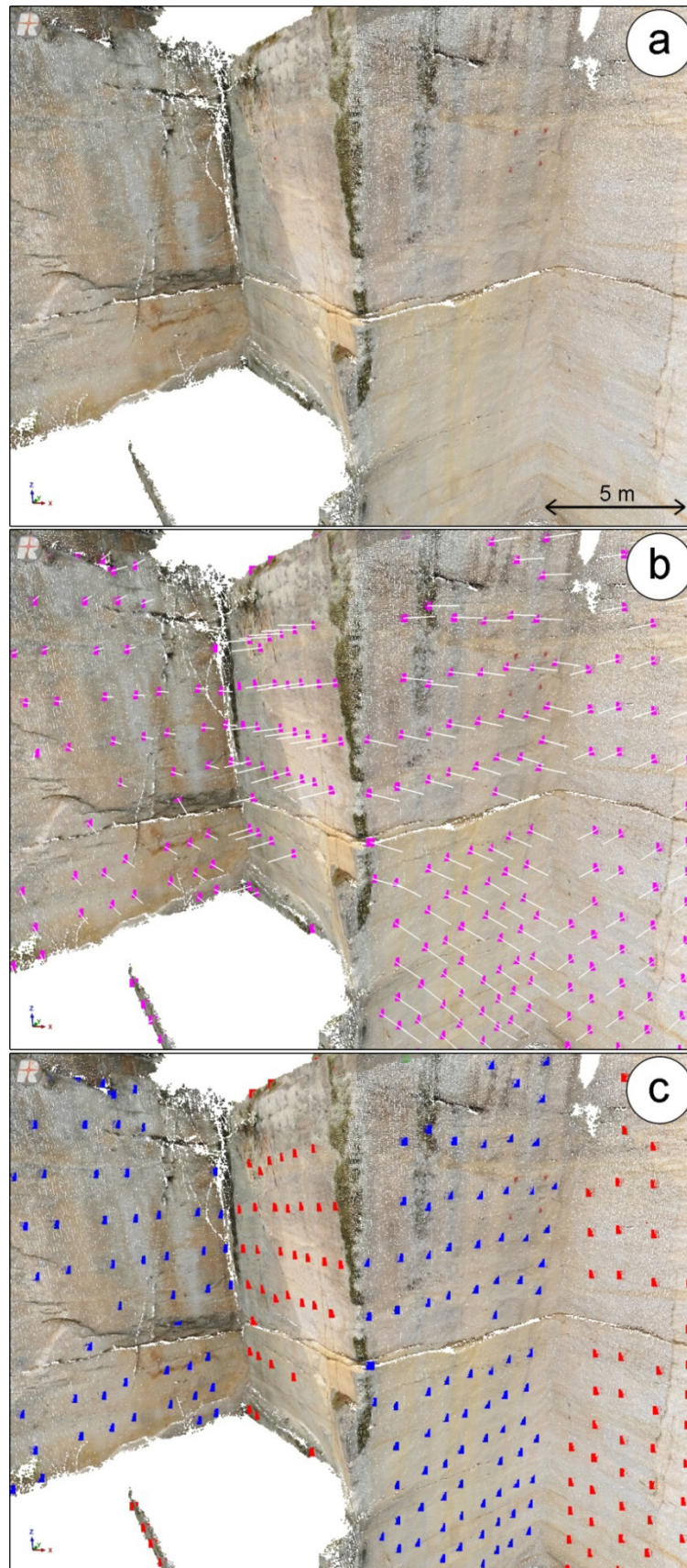


Abbildung 5.5 Detailansicht der Aufschlusswand im Römersteinbruch. (a) Die zur Orientierungsauswertung bereinigte und kolorierte Punktwolke. (b) Berechnung der Normalvektoren (weiß) mit zugehörigen Mittelpunkten (pink) über den „plane patch filter“ bei einer konstanten Würfelgröße von 256 mm. (c) Alle Normalvektoren sind eindeutig 2 Kluftscharen zugeordnet und zur visuellen Unterscheidung und Prüfung in das Modell eingefärbt.



Eine weitere Entscheidungshilfe bei der Identifizierung von Kluftflächen ist durch das Einfärben der Punktwolke entsprechend ihrer Orientierung gegeben. Eine punktweise Orientierungsauswertung erlaubt die Zuordnung eines Orientierungswertes (bestehend aus Einfallrichtung und -winkel) zu jedem Punkt des Modells. Diese Skalare werden jedem Punkt als zusätzliche Eigenschaft angeheftet. Eine Visualisierung dieser zusätzlichen Eigenschaften ist einzeln möglich und erlaubt die Auswahl einer Spannweite an Skalaren. So kann beispielsweise eine Spannbreite an Einfallrichtungen zwischen  $100^\circ$  und  $120^\circ$  und anschließend innerhalb dieser Selektion zusätzlich ein Einfallswinkel von  $80-90^\circ$  selektiert werden (siehe Abbildung 5.6 c + d). Alternativ bietet sich eine Kolorierung der Raumlage im HSV-Farbraum (Hue-Saturation-Value) an. Der Farbwert (*Hue*) hängt von der Einfallrichtung und die Sättigung (*Saturation*) vom Einfallswinkel des Punktes ab. Dieses Farbschema wird über ein Stereogramm gelegt und färbt die Polpunkte der Orientierungswerte ein. Polpunkte, die einer Orientierung nach Süden entsprechen, werden auf diese Weise rot eingefärbt und ein steiler Einfallswinkel von  $90^\circ$  konguieren mit einer vollen Farbsättigung (Abbildung 5.6 b).

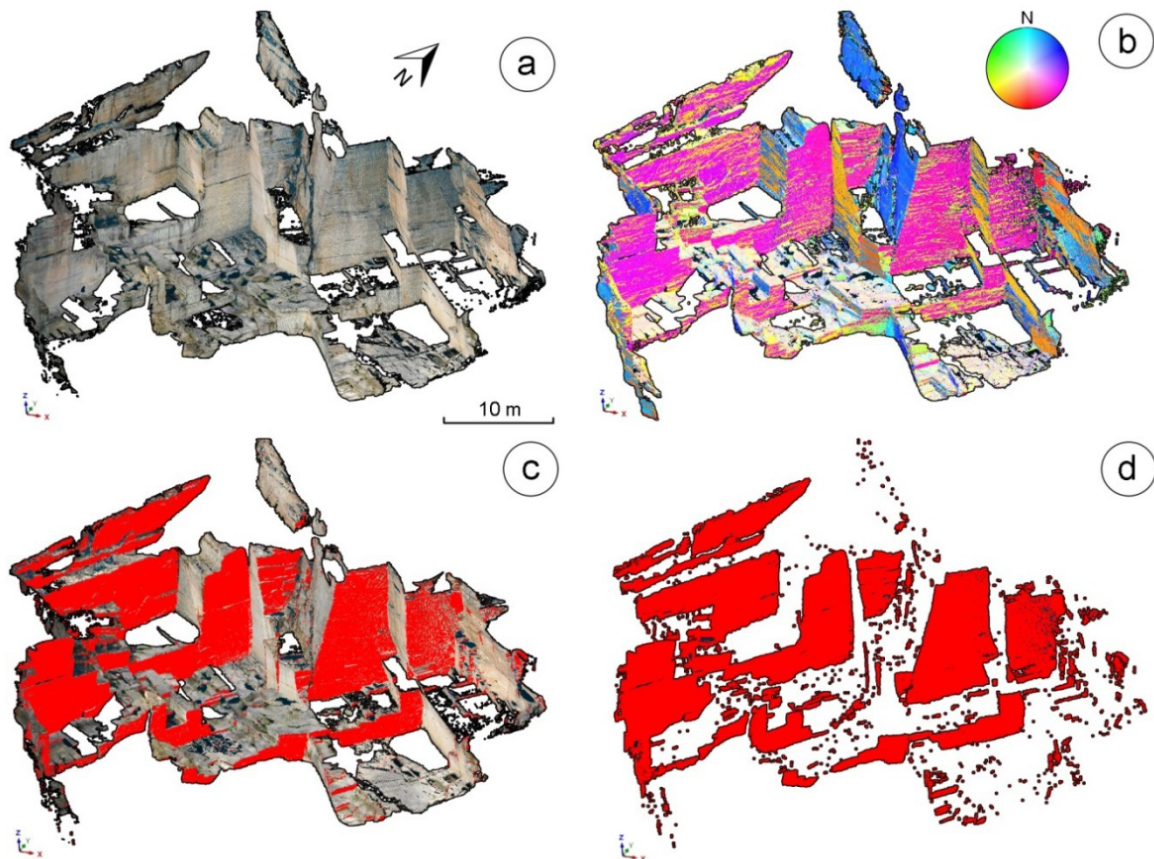


Abbildung 5.6 Schräge Ansicht der Punktwolke des Römersteinbruchs. (a) Die bereinigte Punktwolke dient als Ausgangsdatensatz. (b) Nach der punktweisen Orientierungsauswertung werden alle Punkte nach dem HSV-Farbschema eingefärbt. (c) Eine Kluftchar wird über ihre Orientierungswerte selektiert ( $100-120^\circ$  Einfallrichtung und  $80-90^\circ$  Einfallswinkel) und die Selektion rot eingefärbt. Die Lokalisierung und Identifizierung bestimmter Kluftscharen im Aufschluss bzw. Modell wird so erleichtert. (d) Die Selektion kann aus der Punktwolke komplett extrahiert und einzeln weiter untersucht werden.

### Kontrollierende Parameter

Die erreichbaren Ergebnisse hängen stark von der Wahl der 3 kontrollierenden Parameter, der *Würfelgröße*, *maximalen Flächenfehler* und der *Mindestanzahl an Punkten*, ab. Die Auswirkungen und der Einfluss dieser Faktoren auf die Resultate werden daher im Folgenden genauer beleuchtet.

**Würfelgröße** („*cube size*“): Für die Würfelgröße kann nicht nur ein konstanter Wert angenommen werden, sondern auch eine Spannweite an Werten. Der Algorithmus startet dann mit der höchsten gewählten Würfelgröße. Sollten auch die anderen 2 Parameter eingehalten werden, bildet sich innerhalb dieses Würfels bereits eine Fläche mit einem entsprechenden Normalvektor. Ist dies nicht

der Fall, wird der Würfel in je 8 kleinere Würfel sukzessive verkleinert, bis entweder eine Fläche gefunden wurde oder der Minimalwert erreicht wird. Es empfiehlt sich aber zwingend eine konstante Würfelgröße zu wählen. So ist gewährleistet, dass die Verteilung der Normalvektoren homogen ist und größere Flächenbereiche entsprechend durch mehr Normalvektoren dargestellt werden als kleinere. Das führt direkt zu einer Wichtung der Orientierungsergebnisse, dass größere Flächen auch gemäß ihrer Flächengröße berücksichtigt werden. Variable Würfelgrößen veranlassen, dass sowohl große als auch kleine Flächen durch eine ähnliche Anzahl an Normalvektoren repräsentiert werden. Weiterhin bestimmt eine variable Würfelgröße, dass Flächen (besonders große, ebene Areale) von wenigen Normalvektoren abgedeckt werden und Ecken und Kanten überproportional stark erfasst werden.

**Mindestanzahl Punkte** („*minimum number of points*“): Hochauflösende Punktwolken decken selbst kleine Kluftflächen mit hoher Punktdichte ab. Daher kann gewöhnlich auch die Mindestanzahl an Punkten hoch angesetzt werden (z. B. > 100). Vorsicht ist geboten, wenn klein-skalierte Strukturen bzw. Klüfte über eine kleine Würfelgröße detektiert werden sollen. Die Mindestanzahl an Punkten sollte einen Grenzwert nicht unterschreiten, da irgendwann zufällig im Raum verteilte Punkte fälschlicherweise als Fläche erkannt werden können.

**Maximaler Flächenfehler** („*maximum plane error*“): Dieser Wert spiegelt die maximal erlaubte Standardabweichung der Normalendistanzen der Punkte zur Fläche wider. Hohe Werte dieser „Toleranz“ führen dazu, dass sehr unregelmäßige Oberflächen als Flächen erkannt und berücksichtigt werden. Zu solchen Oberflächen zählen lose Schüttungen oder Füllungen, verwitterte und stark alterierte oder mit Vegetation bedeckte Bereiche. Deren Identifizierung und Mitberücksichtigung ist nicht wünschenswert. Bei Problemen während der Identifizierung von Kluftflächen ist dieser Parameter die erste Anlaufstelle für Änderungen. Ist der Wert des maximalen Flächenfehlers zu niedrig angesetzt, können relevante Flächen unter Umständen nicht erkannt werden, wenn diese beispielsweise einen gewissen Grad an Rauigkeit aufweisen.

Die richtige Wahl der Parameter ist abhängig von den Gegebenheiten der gescannten Oberfläche, also den Aufschlussbedingungen. Darunter fallen beispielsweise das Relief der Oberfläche, Rauigkeit, Anzahl und Größe der Trennflächen, Bewuchs und weitere Artefakte sowie die Entfernung zum Zielobjekt. Zusätzlich korrelieren die 3 kontrollierenden Parameter miteinander. Im Folgenden wird darauf Bezug genommen, in welchem Ausmaß die Parameter beeinflussend wirken und auf die Ergebnisse der Orientierungsauswertung einwirken. Abschließend wird versucht eine Empfehlung zur richtigen Wahl dieser Parameter zu geben.

Dazu wird eine Orientierungsauswertung des Beispieldatensatzes des Römersteinbruchs vorgenommen (Kapitel 4.1.1). Der schon bereinigte Ausgangsdatsatz (Abbildung 5.6a) besteht aus 906321 Punkten. Im Aufschluss können insgesamt 3 Trennflächenscharen ausgemacht werden, darunter zwei subvertikale Kluftscharen, die nach NW-SE und (Schar 1) und NE-SW (Schar 2) einfallen. Weiterhin gibt es eine nahezu horizontale Schichtung (Schar 3).

Zunächst wird die Abhängigkeit der Ergebnisse von einer variablen Würfelgröße untersucht. Die beiden Parameter der Mindestanzahl der Punkte (50 Punkte) und der Flächenfehler (0,02 m) sind hierbei konstant. Die Würfelgröße wird in der Messserie sukzessive von 4,096 m auf 0,128 m reduziert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.7 a als Polpunkte in einem Dichteplot und als Kluftrosen dargestellt. Für die maximale Würfelgröße von 4,096 m ist im Dichteplot überwiegend die Schar 1, die nach NW-SE einfällt, sichtbar. Diese Schar ist gleichzeitig die Dominanteste im Aufschluss und weist größte Flächengröße auf. Darum kann eine gewisse Anzahl an Flächennormalen auch bei einer Würfelgröße von 4 m gebildet werden. Die Reduzierung der Würfelgröße auf bis zu 1,024 m erzeugt auch für die beiden anderen Scharen eine Erhöhung der Anzahl der Normalvektoren und lässt diese nun deutlich sichtbarer als Polpunkte und im Dichteplot erscheinen. Ebenfalls in den Kluftrosen ist nun die zweite NE-SW gerichtete Kluftchar deutlich zu erkennen. Sowohl die Kluftchar 2 als auch 3 offenbaren verglichen mit der Schar 1. eher kleine, offenliegende Flächen im Römersteinbruch. Die weitere Reduzierung der Würfelgröße erzeugt nun immer mehr Normalvektoren auch auf kleinen Flächen, so dass diese beiden Scharen immer deutlicher erkennbar werden. Gleichzeitig steigt aber auch die Anzahl der Normalvektoren auf den relativ größeren Flächen der

Schar 1. Dieser Trend ist auch in Abbildung 5.9 b deutlich sichtbar. Wie auch aus den Kluftrosen ersichtlich ist, bleiben die Hauptorientierungsrichtungen ab einer Würfelgröße von 2,048 m nahezu unverändert. Jedoch ist eine erhebliche Zunahme der Streuung der Polpunkte zu beobachten, was eine eindeutige Bewertung der durchschnittlichen Orientierung einer Schar erschwert.

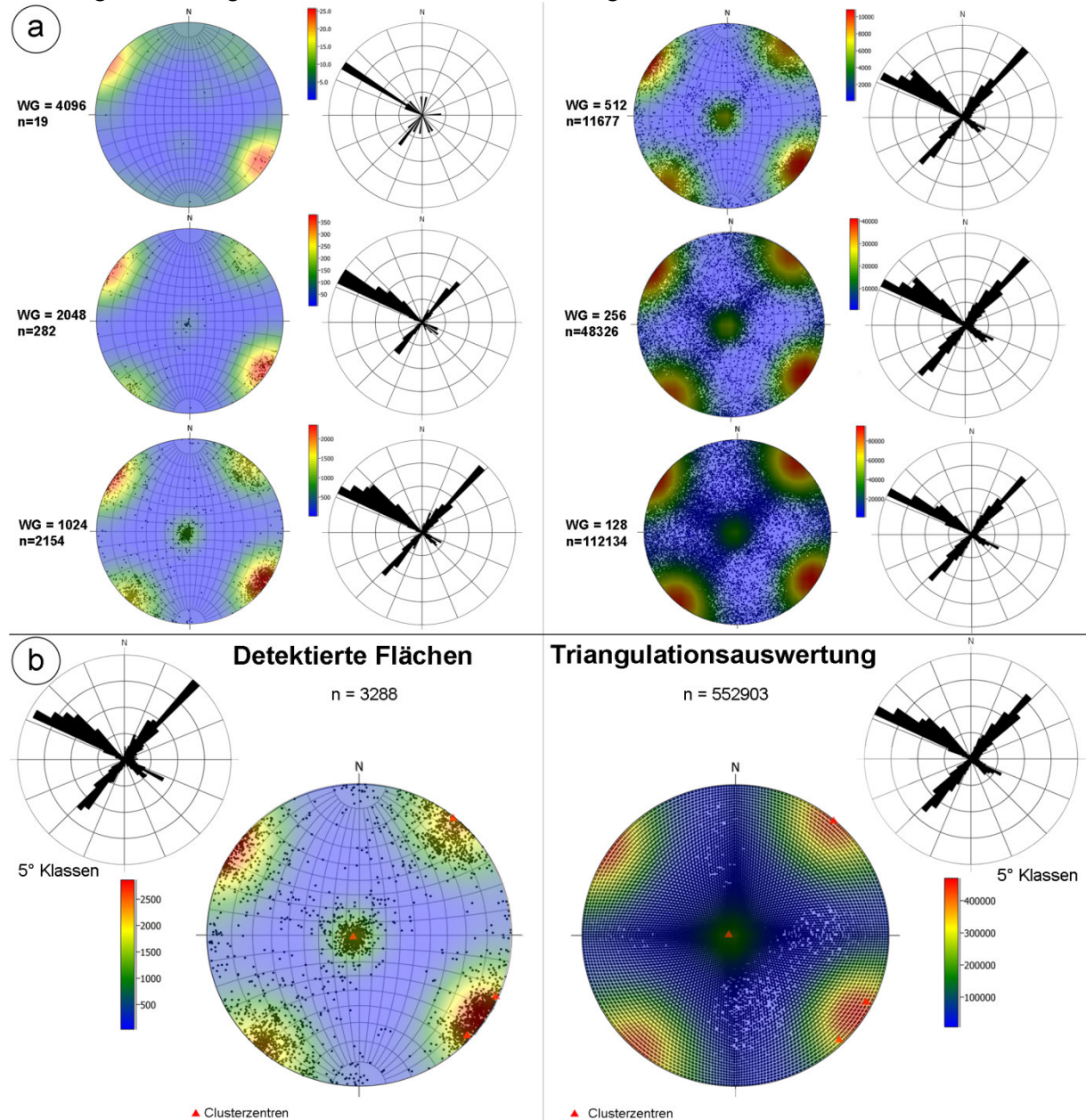


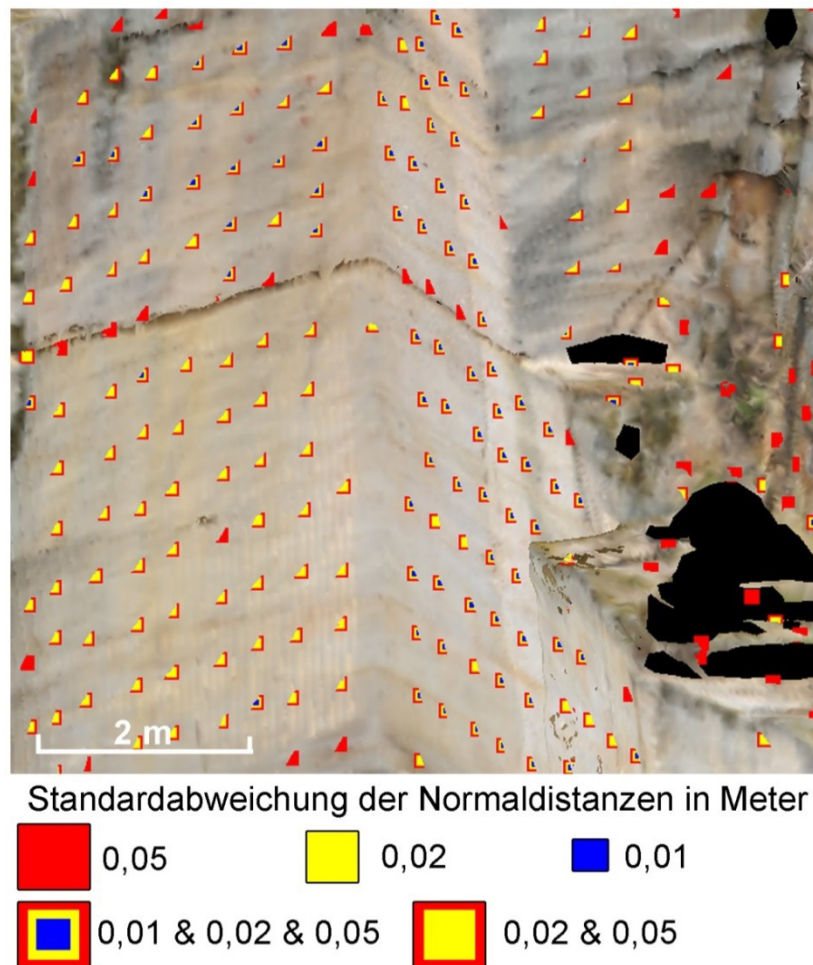
Abbildung 5.7 (a) Vergleich der Ergebnisse sechs unterschiedlicher Würfelgrößen zwischen 4,096 m und 0,128 m bei der Auswertung der Orientierung. Die Ergebnisse sind als Polpunkte in Dichteplots (untere Hemisphäre) und als Kluftrosen dargestellt. Der maximale Flächenfehler und die Mindestanzahl an Punkten sind hierbei konstant. (b) Darstellung zweier Methoden zur Orientierungsauswertung als Vergleich zur Methode unter (a). Links eine Methode, die die Normalvektoren detektierter Flächen innerhalb einer Triangulation betrachtet (über die Software SplitFX) und rechts die Auswertung der Orientierung aller Dreiecke der Triangulation. Die erstgenannte Methode liefert 3288 Orientierungswerte, vernachlässigt aber eine Einbeziehung der Flächengröße. Die zweite Methode liefert mehr als 500000 Werte, die zwar eine Flächenwichtung beinhalten, aber das weitere Bearbeiten der Daten erschweren. Die berechneten Cluster-Zentren beider Methoden stimmen jedoch gut überein.

In Abbildung 5.7 b sind zwei weitere Standardverfahren zur Orientierungsauswertung aus der Punktwolke durchgeführt. Zum einen eine Auswertung auf Grundlage eines triangulierten Meshs, bei dem 552903 Normalvektoren der einzelnen Dreiecke ausgewertet werden (rechts in der Abbildung), zum anderen eine Flächendetektion auf der Grundlage der Zusammenführung benachbarter Dreiecke gleicher Orientierung, bei der 3288 Flächen identifiziert werden (links). Beiden Methoden ist hierbei

gemein, dass sie, im Gegensatz zu der hier in der vorliegenden Dissertation vorgestellten Methode, eine Triangulation voraussetzen. Die Auswertung der Datensätze bestätigt die ermittelten Orientierungswerte, jedoch fehlt bei der Flächenauswertung eine Wichtung der Daten bezüglich ihrer Flächengröße, da auch große Flächen nur durch einen Vektor und somit einen Polpunkt dargestellt werden. Die Auswertung aller Dreiecke der Triangulation führt zu einem zu großen Datensatz, der visuell keine Unterscheidung bei der Polpunktdichte zulässt und nur über einen Dichteplot darlegt, welche Orientierungen vorhanden sind. Es ist dadurch keine Verbesserung der Ergebnisse erkennbar und die weitere Bearbeitung wird durch die große Anzahl an Ergebnissen erschwert.

Als zweiter Parameter wird der *maximale Flächenfehler* untersucht, der einer maximalen tolerierten Rauigkeit einer detektierten Fläche gleicht. Der Einfluss der Veränderung dieses Parameters lässt sich zunächst in Abbildung 5.8 ausmachen. Dort sind die erzeugten Mittelpunkte der Flächendetektion für 3 verschiedene Toleranzwerte direkt in der Punktwolke des Römersteinbruchs dargestellt (rot = 0,05m, gelb = 0,02 m und blau = 0,01 m). Mit ansteigendem Toleranzwert steigt auch die Anzahl der erzeugten Mittelpunkte und somit die Anzahl der zur Orientierungsauswertung benötigten Normalvektoren. Der niedrigste Wert von 0,01 m erzeugt allerdings auf der Fläche links im Bild nur eine geringe Anzahl an Vektoren, während rechts auf einer ähnlichen, aber anders orientierten großen Fläche viele Punkte erzeugt werden. Die natürliche Rauigkeit der Oberfläche verhindert hier ein Einhalten des maximalen Fehlers von 0,01 m. Jedoch ist auch eine Identifizierung der Fläche links angestrebt. Durch die Verdopplung des Toleranzwertes auf 0,02 m ergibt sich eine erstrebenswerte, homogene Verteilung der Punkte über alle sichtbaren Flächen. Eine weitere Erhöhung auf einen Wert von 0,05 m führt dazu, dass Normalvektoren in nicht erstrebenswerten Teilen des Aufschlusses erstellt werden. So sind rechts (Abbildung 5.8) Bereiche abgedeckt, in denen keine Kluftflächen erkennbar sind, sondern Schuttbereiche. Der Idealwert in diesem Beispiel liegt also bei einer Toleranz von ungefähr 0,02 m.





**Abbildung 5.8** Visualisierung der erzeugten Normalvektoren in der Punktwolke für 3 unterschiedlich gewählte Parameter des maximalen Flächenfehlers, der die Standardabweichung der Normalendistanzen in Metern angibt. Deutliche Variationen in Anzahl und Verteilung der Normalvektoren sind für die 3 Fälle zu beobachten.

In Abbildung 5.9a ist der Zusammenhang zwischen dem *maximalen Flächenfehler* und der *Mindestanzahl Punkte* für die Flächendetektion aufgeführt (bei konstanter *Größe des Suchwürfels* von 0,512 m). Die *Mindestanzahl an Punkten* liegt jeweils bei 50, 200 und 2000. Die Anzahl an Normalenvektoren und somit an detektierten Flächen steigt mit der Erhöhung des Toleranzwertes von 0,001 bis zu 0,2 m. Innerhalb einer Größenordnung von 0,01 zu 0,1 m verdoppelt sich die Anzahl der Normalvektoren. Bei kleinen Werten um 0,001 m werden gar keine Vektoren mehr identifiziert. Dort befindet man sich in einem Bereich, der unter der natürlichen Unebenheit von Flächen und auch unterhalb des gerätespezifischen Rauschens des Scanners, das sich in der Punktwolke widerspiegelt, liegt. Oberhalb von 0,1 m ist kein signifikanter Zuwachs an Normalvektoren zu verzeichnen. Schon bei niedrigerer Toleranz sind alle Flächen mit Normalvektoren belegt worden, so dass keine weiteren hinzukommen. Nachteilig ist hierbei, dass auf diese Weise auch die Identifizierung von Eckbereichen und Kanten sichergestellt ist, wie bereits in Abbildung 5.8 verdeutlicht. So hohe Werte sind zu vermeiden, die Detektion der Flächen wird zweifelhaft. Das Diagramm hilft weiterhin bei der Beurteilung der Irregularität der zu untersuchenden Oberflächen. Da gerade für sehr niedrige Toleranzwerte der Anstieg an Normalvektoren sehr groß ist und bereits ab 0,05 m deutlich abnimmt, kann in diesem Beispiel von einer hohen Regularität der Oberflächen gesprochen werden.

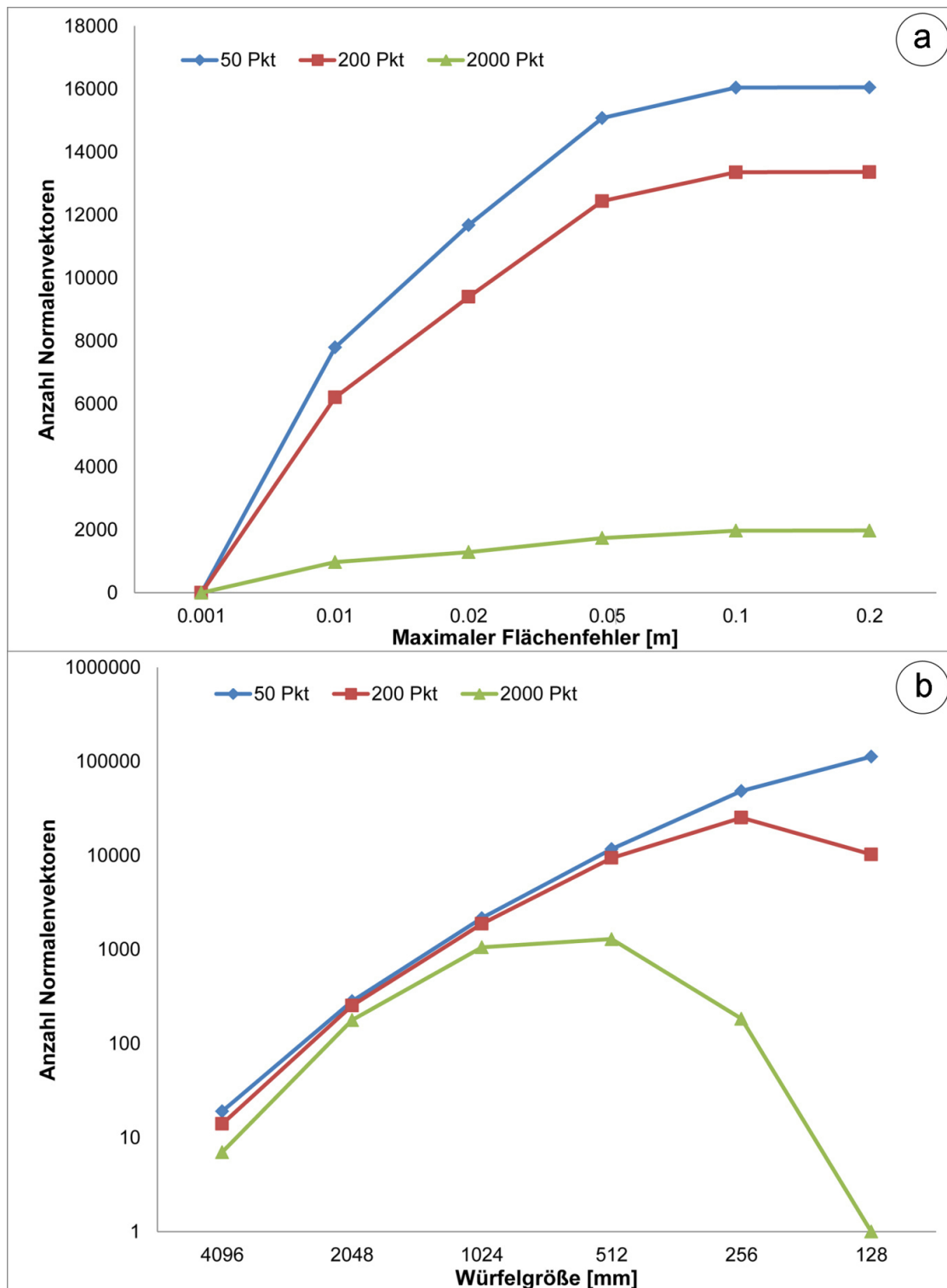


Abbildung 5.9 Vergleichende Abbildungen der Normalvektoren unter variierenden Parametern bei der Orientierungsauswertung. (a) Verhältnis der erzeugten Normalvektoren und des maximalen Flächenfehlers für 3 Parameter der Mindestanzahl an Punkten. (b) Anzahl der erzeugten Normalvektoren unter variierender Würfelgröße und ebenfalls 3 verschiedener Werte der Mindestanzahl an Punkten.

Die Abhängigkeit der Anzahl der Normalvektoren von der *Größe des Suchwürfels* und der *Minimalzahl an Punkten* ist in Abbildung 5.9b verdeutlicht. Hier ist der *maximale Flächenfehler* konstant bei 0,02 m. Die blaue Kurve spiegelt die bereits dargestellten Ergebnisse aus Abbildung 5.7a wider. Diese zeigt einen nahezu exponentiellen Anstieg mit abnehmender Würfelgröße. Auch die beiden anderen Kurven bei 200 (rot) und 2000 (grün) zeigen diesen exponentiellen Trend bis zu einer Würfelgröße von 1,024 m. Bei weiterer Reduzierung der Würfelgröße verringert sich zunächst der



Anstieg der Kurve und schlussendlich sinkt auch die Gesamtzahl erkannter Normalvektoren ab. Dieser Wendepunkt liegt bei 200 Punkten für eine Würfelgröße von 0,256 m und 2000 Punkten mit 0,512 m. Bei einer Größe von 0,128 m wird bereits keine einzige Fläche mehr für die Mindestanzahl von 2000 Punkten detektiert. Das hängt damit zusammen, dass mit der Unterschreitung einer spezifischen Würfelgröße nicht mehr genügend Punkte alle Bedingungen für die Flächenerstellung erfüllen, insbesondere die Mindestanzahl von Punkten ist hier als kritisch anzusehen. Wann dieser Wendepunkt genau erreicht wird, hängt also von den natürlichen Gegebenheiten des Aufschlusses ab, unter anderem wie groß die dort ausgebildeten Flächen sind, aber vor allem auch von der Dichte der Punktwolke. Höhere Auflösungen am Scanner führen zu einer Erhöhung der Punktdichte und würden so diesen Wendepunkt zugunsten niedriger Würfelgrößen verschieben. Die Punktdichte in einem 3D-Modell ist nicht zwangsläufig homogen verteilt. Die Punktdichte variiert je nach Entfernung oder Anzahl der an einem Ort überlagerten Punktwolken. Eine Anhebung des Parameters der Mindestanzahl an Punkten führt so vornehmlich zu einer Erstellung von Normalvektoren in den Bereichen der höchsten Punktdichte. Weitere Bereiche niedriger Punktdichte bleiben dabei unberücksichtigt. Ein im Voraus angewendeter Octree-Filter (Riegl LMS 2013) ist daher empfehlenswert. Dieser führt zu einer homogenen Verteilung der Punkte und einer gleichmäßigen Punktdichte, reduziert aber gleichzeitig die Auflösung.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Mindestanzahl an Punkten ein sehr gewichtiger Kontrollparameter bei der automatischen Identifizierung von Flächen ist. Er hängt besonders von der Ausgangsauflösung bzw. Punktdichte der Punktwolke ab, und von weiteren Filterungsprozessen, wie einem Octree-Filter. Zur Untersuchung des gesamten Trennflächen- bzw. Kluftnetzwerks empfiehlt es sich eine hochauflösende Punktwolke zu erstellen und eine geringe Anzahl an Mindestpunkten zu wählen, die aber selbstverständlich einen sinnvollen, unteren Grenzwert nicht unterschreiten darf. Die Auswertung auch kleiner Klüfte bedingt die Wahl kleiner Suchwürfelgrößen.

Eine Erhöhung bei der Toleranz des maximalen Flächenfehlers führt, wie bereits weiter oben erläutert, zu einer drastischen Erhöhung der Anzahl der Normalvektoren auch in Bereichen, in denen keine wirklichen Flächen abgebildet sind (siehe Abbildung 5.8). In Abbildung 5.10 ist der Zusammenhang des maximal erlaubten Flächenfehlers und den ermittelten Orientierungswerten verdeutlicht. Dargestellt sind dabei die Einfallrichtungen der Flächen. Drei unterschiedliche Werte für den Parameter werden gewählt, 0,01 (a), 0,05 (b) und 0,1 (c) m. Die Mindestanzahl an Punkten liegt konstant bei 50 und die Würfelgröße bei 1,024 m. Vier Hauptorientierungsrichtungen können ausgemacht werden, die nach 40°, 130°, 225° und 300° einfallen. Diese können eindeutig den Hauptklüftungsrichtungen NE-SW und NW-SE zugeordnet werden. Für alle 3 unterschiedlichen Flächenfehler sind die Orientierungen identisch. Für den Fall (b) und (c) ist die Anzahl der detektierten Normalvektoren in jede Richtung nahezu identisch. Trotz Erhöhung der Toleranz ist keine signifikante Zunahme festzustellen. Für den Fall (a) (blaue Balken) liegt die Anzahl der Vektoren in allen Bereichen darunter, die Differenz zu (b) und (c) verbleibt dabei ungefähr auf einem gleichbleibenden Level. Der Parameter hat in diesem Beispiel also keinen direkten Einfluss auf die erkannten Orientierungen, sondern nur auf die Anzahl der erzeugten Normalvektoren. Bei der Orientierungsauswertung sind nur die Peaks des Balkendiagramms von Bedeutung. Die Streuung der Orientierungen aus den Zwischenräumen wird fortan als „Orientierungsrauschen“ bezeichnet. Dies sind in der Regel Normalvektoren aus Bereichen der Punktwolke, die keiner geraden Kluftfläche angehören, sondern in anderen, auch Schuttbereichen, ausgemacht werden oder entlang unregelmäßiger Kanten oder Ecken. Dieses Orientierungsrauschen ist auch innerhalb der Polpunktdarstellung gut zu erkennen. Diese müssen bei der Auswertung nicht weiter betrachtet werden. Um eine Aufnahme dieser Punkte zu vermeiden, empfiehlt sich in dem hier gezeigten Beispiel die Verwendung eines maximalen Flächenfehlers von 0,01m. Dieser deutet bereits ausreichend die wichtigsten Einfallrichtungen ab und reduziert erheblich die Größe des resultierenden Datensatzes.

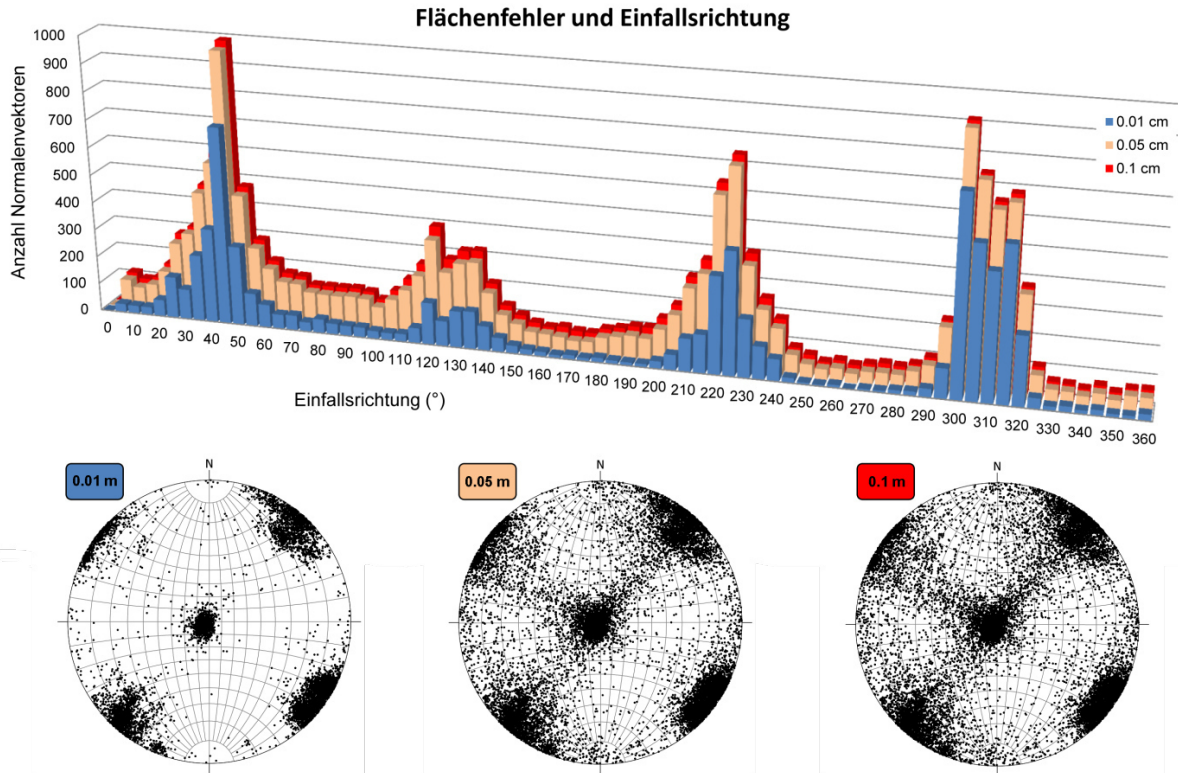


Abbildung 5.10 Vergleich der resultierenden Normalvektoren aus der Orientierungsanalyse bei Anwendung variabler Größen des maximal tolerierten Flächenfehlers (0,01 m, 0,05 m, 0,1 m). Sowohl das Balkendiagramm als auch die Polpunktdarstellungen verdeutlichen eine Zunahme in der Streuung bzw. eine Erhöhung des Rauschens der Orientierung mit zunehmender Toleranz des Flächenfehlers. Die grundlegenden Orientierungen bleiben dabei jedoch unberührt.

### 5.1.2 Bestimmung der Orientierung mittels eines RANSAC-Algorithmus

Eine zweite Variante die Orientierung in einer Punktwolke zu bestimmen, besteht in der Anwendung eines RANSAC Algorithmus. Eine genaue Beschreibung dieses Algorithmus' ist in Kapitel 5.2.3 zu finden.

Auch diese Methode kann direkt auf die Punktwolke angewendet werden und erfordert keine Triangulation. Benachbarte Punkte gleicher Orientierung werden hier zu Flächen zusammengefasst und durch Polygone umrandet. Die Orientierung dieser Flächen kann direkt exportiert werden als Einfallswinkel und Einfallsrichtung. Hierzu wird die Software CloudCompare (EDF R&D 2014) genutzt, dessen als C++ Code integrierter RANSAC Algorithmus für diesen Zweck angepasst wurde. Die Identifizierung der Flächen hängt direkt von den gewählten Eingabeparametern des Algorithmus ab (Tabelle 5.2) und kann direkt visuell überprüft werden (Abbildung 5.11). Bei der Flächenorientierung kritische Parameter sind die „*minimum supports points per primitive*“, „*maximum distance to primitive*“ und „*maximum normal deviation*“, die direkt die Ergebnisse der Orientierungsauswertung beeinflussen. Anders als bei der erstgezeigten Methode (vgl. Abbildung 5.10) gibt es hier kein „Rauschen“. Bereiche in Ecken und Kanten werden nicht fälschlicherweise als Flächen identifiziert. Der Algorithmus reagiert insgesamt weniger sensibel auf Veränderungen der Parameter.

Die „*minimum supports point per primitive*“ ist nichts anderes als die Anzahl an Punkten, die mindestens gegeben sein müssen, um eine Fläche zu erzeugen. Diese hängt auch direkt mit der ursprünglichen Auflösung der Punktwolke zusammen, aber auch mit der Mindestgröße der Kluftflächen, die identifiziert werden soll. Für kleinräumige Strukturen bietet sich daher ein geringer Wert des Parameters an.

Das Äquivalent zum *maximalen Flächenfehler* aus Kapitel 5.1.1 spiegelt hier die „*maximum distance to Primitive*“ wider. Auch dieser ist ein Toleranzwert und ebenfalls an die natürliche Rauigkeit derjenigen Flächen gekoppelt, die identifiziert werden. Hohe Toleranzwerte können hier schnell zu Fehlern führen und Bereiche miteinander verbinden, die eigentlich zu zwei unterschiedlichen

Kluftflächen gehören. Beispielsweise führt ein Toleranzwert von 0,5 m dazu, dass bis zu einem halben Meter Abstand in der Nachbarschaft eines Ausgangspunktes nach weiteren Punkten gleicher Orientierungen gesucht wird. Getrennte Strukturen können so fälschlich zu einer Fläche zusammengefügt werden.

Schlussendlich spiegelt die „*maximum normal deviation*“ die maximale Orientierungsabweichung benachbarter Punkte wider. Auch diese ist direkt abhängig von der natürlichen Rauigkeit der Fläche und muss entsprechend gewählt werden. Zu hohe Werte führen zu einer falschen Zusammenführung benachbarter Punkte und bilden somit keine Flächen ab.

**Tabelle 5.2** Gewählte Parameter für den RANSAC Algorithmus zur Identifizierung der Flächen in der Punktwolke des Steinbruchs Rockenau.

<b>Minimum support points per primitive</b>	<b>100</b>
<b>Maximum distance to Primitive</b>	<b>0,10</b>
<b>Sampling Resolution</b>	<b>0,08</b>
<b>Maximum normal deviation</b>	<b>5°</b>
<b>Overlooking Probability</b>	<b>0,000001</b>

Der vorgestellte Algorithmus wird auch an der Punktwolke des Römersteinbruchs erprobt und anschließend mit den vorherigen Ergebnissen verglichen. Insgesamt 289 Flächen werden in der Punktwolke identifiziert (Abbildung 5.11). Der Algorithmus bildet erfolgreich alle vorkommenden Flächen des Steinbruchs ab und ermöglicht so eine allumfassende Auswertung der Orientierungen. Die Ergebnisse (als Dichteplot, Polpunkte und Kluftrose) werden in Abbildung 5.12 dargestellt. Ein etwaiges Rauschen bzw. eine hohe Streuung der Polpunkte ist nicht zu erkennen. Zwar schwanken die Polpunkte der NE-SW und NW-SE Schar um einen Mittelpunkt, zeigen aber im Dichteplot und der Kluftrose eine eindeutige Richtung. Zu bemerken ist jedoch auch hier, dass der Schwankungsbereich der Kluftrose etwas höher ist als bei der Orientierungsauswertung nach Methode 1 mit dem „*plane patch filter*“ (vergleiche Abbildung 5.7).

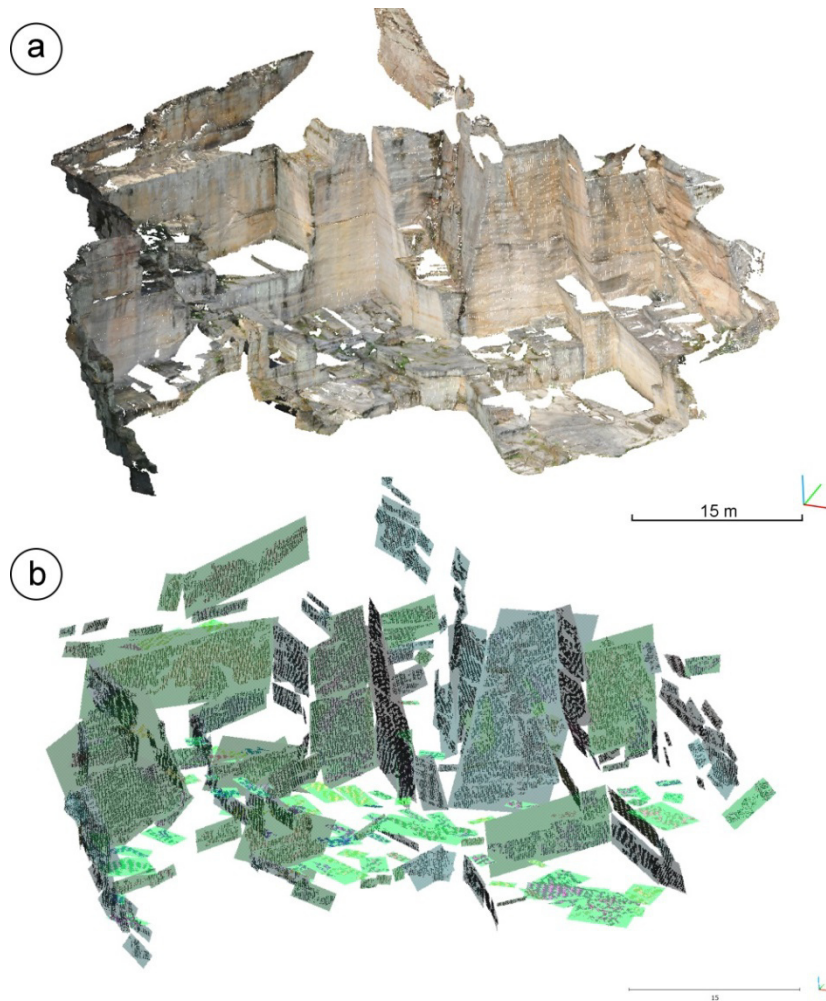


Abbildung 5.11 Auswertung der Orientierungen der Ausgangspunktwolke (a) durch Anwendung eines RANSAC Algorithmus zur Identifizierung der vorhandenen Flächen. Die Ergebnisse (b) zeigen, dass viele Bereiche des Steinbruchs erfolgreich durch konstruierte Flächen abgedeckt sind und der Algorithmus erfolgreich war.

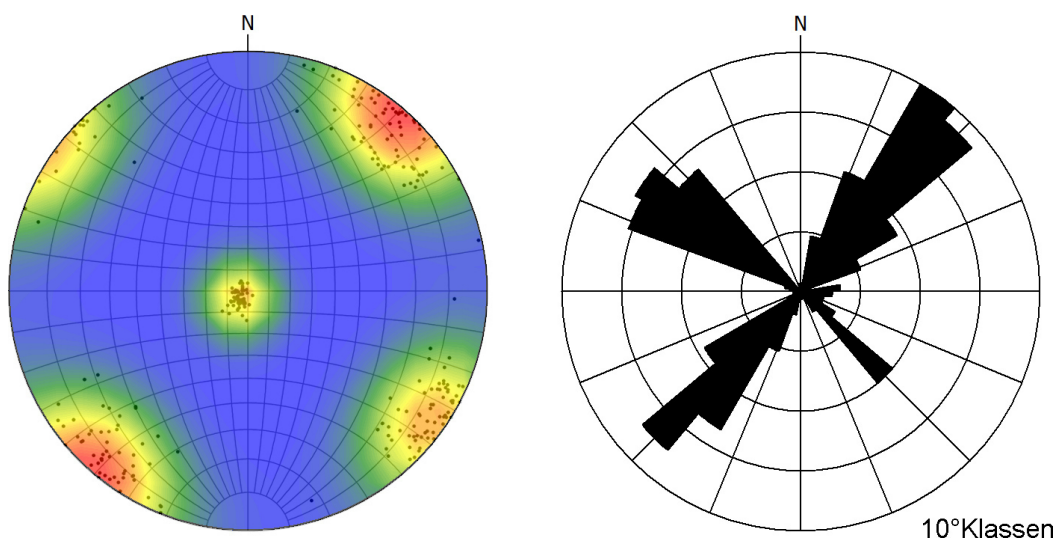


Abbildung 5.12 Darstellung der Ergebnisse nach Anwendung des RANSAC Algorithmus. In der kombinierten Darstellung der Polpunkte und der Polpunktdichte (links) sind deutlich 3 Trennflächenscharen zu erkennen, eine nahezu horizontale Schichtung und 2 nach NE-SW und NW-SE einfallenden Kluftscharen. Insgesamt sind 289 Orientierungen identifiziert. Die Streuung der beiden Kluftscharen ist teilweise deutlich erkennbar und wird auch in der Kluftrose (rechts) noch einmal deutlich.

Sowohl für Methode 1 als auch 2 (RANSAC-Algorithmus) sind die Clusterzentren berechnet und in Tabelle 5.3 dargestellt. Deutlich zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse, die den Schluss zulassen, dass beide Methoden exakte Ergebnisse liefern. Die Zentren der NW-SE Schar liegen genau übereinander, für die Schar NE-SW weichen die Resultate nur minimal ab.

**Tabelle 5.3 Vergleich der berechneten Clusterzentren nach Methode 1 (plane patch filter) und Methode 2 (RANSAC). Die Ergebnisse zeigen ausgezeichnete Übereinstimmung.**

Clusterzentrum		
Schar	Methode 1	Methode 2
NE-SW	040/90	221/89
NW-SE	305/87	305/86
Schichtung	048/05	054/05

### 5.1.3 Diskussion

Zwei Methoden zur Orientierungsauswertung werden vorgestellt. Beide zeigen übereinstimmende Ergebnisse und eignen sich daher für die Bestimmung dieses Parameters. Unterschiede bestehen zwischen den beiden Methoden in der Auswahl kontrollierender Parameter und des Arbeitsablaufs. Mit zunehmender Größe wird die Anwendung eines RANSAC-Algorithmus zeitaufwendiger. Gerade bei der Suche nach passenden Parametern ist der Zeitaufwand ein Hindernis. Hier erweist sich die Auswertung über RiSCAN Pro als vorteilhafter. Normalvektoren, die mit RiSCAN Pro identifiziert werden, erzeugen ein Wichtungsverhältnis, da größere Flächen durch mehr Vektoren dargestellt werden. Dies projiziert sich dadurch auch in den Ergebnissen. Die RANSAC-Methode besitzt so eine Wichtung nicht, jeder Polpunkt stellt eine Fläche - unabhängig von der Größe - dar. Durch die fehlende Wichtung und insgesamt geringere Anzahl an Ergebnissen werden aber auch weniger dominante Richtungen in der Darstellung sichtbar, die eventuell von großen und häufigen Scharen überprägt werden würden.

Es gilt bei der Berechnung der Orientierungen aus RiSCAN Pro zu beachten, dass die kontrollierenden Parameter direkten Einfluss auf die Ergebnisse haben. Die zu wählende *Würfelgröße* hängt von der Größe der zu untersuchenden Trennflächen ab. Kleine Trennflächen benötigen eine kleine *Würfelgröße*, da sie sonst aus der Untersuchung rausfallen. Zu kleine *Würfelgrößen* führen dazu, dass große Trennflächen derart dominant in den Ergebnissen präsent sind, dass kleine Strukturen „überprägt“ und nicht weiter berücksichtigt werden. Sie sind beispielsweise in einer Dichteplotdarstellung der Polpunkte nicht mehr sichtbar. Die richtige Wahl der Parameter ist stark von der Beschaffenheit des Aufschlusses abhängig und obliegt dem Bearbeiter. In dieser Arbeit können nur allgemeine Hinweise bezüglich der Auswirkung kontrollierender Parameter auf die Ergebnisse gegeben werden. Die Wahl der *minimalen Anzahl an Punkten* korreliert mit der ursprünglichen Auflösung der Punktwolke. Zunächst ist ein Octree-Filter empfehlenswert, bevor die Orientierungsanalyse durchgeführt wird, da diese die Punktdichte weitestgehend homogenisiert. Der Parameter sollte nicht unter einen bestimmten Schwellenwert fallen, da die Darstellung einer Fläche aus wenigen Punkten ungenaue Ergebnisse nach sich zieht. Zur Identifizierung kleiner Strukturen ist eine hohe Punktdichte unerlässlich. Für größere *Würfelgrößen* nimmt die Bedeutung des Parameters der *minimalen Anzahl an Punkten* stetig ab. Diese Kopplung der beiden Parameter untersagt die Nutzung kleiner *Würfelgrößen* für Punktwolken niedriger Punktdichte. Der *maximale Flächenfehler* beruht auf der Struktur der Trennflächenoberfläche. Demnach verlangen raue Trennflächen höhere Toleranzwerte als sehr ebene Strukturen. Zu den beiden anderen Parametern besteht keine direkte Kopplung. Der Idealwert wird unabhängig bestimmt. Im Millimeterbereich tritt wiederum die Schwierigkeit eines Punktrauschens auf. Durch hardwareseitige Ungenauigkeiten werden auch ebene Flächen unter Umständen uneben in der Punktwolke dargestellt. Dieser Umstand verhindert die Wahl eines maximalen Flächenfehlers unterhalb der Genauigkeit des Geräts.

Viele der Einschränkungen in den kontrollierenden Parametern sind eins zu eins auf die zweite Methode, den RANSAC-Algorithmus, übertragbar. Die „*minimum support points per primitive*“ sind der minimalen Punktzahl der Methode 1 gleichzusetzen. Bei Methode 2 ist der Toleranzwert über

einen Winkel angegeben, der „*maximum normal deviation*“. Auch dieser hängt direkt von der Rauigkeit der Oberflächen ab. Hinzu kommen zwei neue Parameter. Die „*maximum distance to primitive*“ ähnelt einem Toleranzwert und sollte ebenfalls eher niedrig angesetzt werden, um Fehler in der Flächenidentifizierung zu vermeiden. Die „*Sampling Resolution*“ muss der Auflösung der Punktwolke angeglichen werden und hat keinen direkten Einfluss auf die Orientierungsergebnisse. Ein falscher Wert führt lediglich zu einer Verhinderung der Flächenerstellung.

Die Toleranzwerte der beiden Methoden bilden den wichtigsten Parameter. Denn über ihn kann festgelegt werden, wo Normalvektoren auf der Oberfläche erstellt werden. Er verhindert maßgeblich, dass Bereiche, die keine Fläche bilden, mit in die Auswertung fließen. Jegliche Unebenheiten, beispielsweise Schuttflächen, können so über den Algorithmus exkludiert werden. Geringe Toleranzen identifizieren extrem planare Bereiche. Hier ist Vorsicht geboten, da zu geringe Toleranzen zu einer Nichtidentifizierung vorhandener Trennflächen führen.

Eine Bereinigung der Punktwolke im Vorfeld der Untersuchungen ist obligatorisch. Die Methode mit RiSCAN Pro zeigt jedoch eine geringe Sensibilität gegenüber Vegetation. Die Auswahl der kontrollierenden Parameter verhindert eine Mitberücksichtigung der Vegetation bei der Auswertung. Einzelne Gräser oder Äste auf einer Gesteinswand wirken sich nicht negativ auf die Ergebnisse aus, so dass eine umständliche Entfernung im Voraus überflüssig ist. Größere Vegetationsbereiche, gerade wenn diese der Aufschlusswand im geringen Abstand vorgelagert sind, müssen jedoch entfernt werden.

Beide Methoden sind unabhängig von der Qualität einer zuvor durchgeführten Triangulation, da sie direkt auf der Punktwolke angewendet werden. Eine homogene Punktverteilung wirkt sich begünstigend auf die Flächenidentifizierung aus, da die kontrollierenden Parameter konstant für das ganze Modell anzunehmen sind. In einer inhomogenen Punktwolke können Flächen unter Umständen nur in Bereichen hoher Punktdichte erkannt werden. Die Wahl der Parameter hängt von der Auflösung und der natürlichen Beschaffenheit des Aufschlusses ab. Die Auswahl der richtigen Parameter beruht überwiegend auf Erfahrungswerten.

Ein Nachteil der Methode ist, dass die endgültige Bestimmung der Orientierung einer Kluftschar auf eine Clusteranalyse beruht, die einen mittleren Orientierungswert angibt. Der hier dargestellte k-means Algorithmus eignet sich nur eingeschränkt für die Analyse einer großen Anzahl an Orientierungswerten. Zwangsläufig liefert gerade die Methode 1 (*plane patch filter*) eine hohe Anzahl an Daten. Selten vorkommende Orientierungen können nicht immer durch Anwendung der Clusteranalysen erkannt werden. Die hohe Polpunktdichte der Hauptorientierungen überprägt die Ergebnisse. Hier empfiehlt sich zukünftig die Ermittlung verbesserter Methoden der Clusteranalyse.



## 5.2 Größe

Dieses Kapitel gibt Einblick in die Ermittlung der Trennflächengrößen aus Laserscanpunktvolken. Verschiedene Ansätze und Methoden werden vorgestellt, mit denen die Auswertung der Orientierung aus Punktwolken möglich ist. Sie werden anschließend miteinander verglichen. Die Erprobung der Methodik erfolgt am Steinbruch Rockenau (s. Kapitel 4.1.2).

Grundlegendes zum Parameter **Größe** im Rahmen der Trennflächenanalysen sowie der **Form** von Trennflächen, die bei der Bestimmung der Größe ebenfalls eine Rolle spielt, werden bereits in Kapitel 2.5 beleuchtet. Dort wird auf die unterschiedlichen Definitionen der Größe, deren Ausdruck als Länge und die Form von Trennflächen näher eingegangen.

### 5.2.1 Kluftgröße aus Punktwolken

Allgemein ist die Persistenz auch als prozentualer Flächenanteil innerhalb eines Felsgesteins definiert, der von Klüften bzw. Trennflächen (oder besser einer ganzen Schar) eingenommen wird (Cruden 1977). Die Persistenz oder Spurlänge von angeschnittenen Trennflächen an Aufschlusswänden wird genutzt, um die Größe der Trennflächen abzuschätzen. Während einer Geländekampagne werden dazu unterschiedliche Methoden angewandt. So können bei der Scanline-Methode - bei der die Länge und Anzahl der Klüfte bestimmt wird, die eine eindimensionale Linie schneiden,, ein „Window Mapping“ oder „Circular Window Sampling“ genutzt werden (Warburton 1980b, Zhang und Einstein 1998, Mauldon et al. 2001, Mauldon 1998). Anschließend wird die zugrunde liegende statistische Verteilungsfunktion zur endgültigen Beschreibung und Abschätzung aller Längenwerte berechnet. Die Methoden wurden detailliert in den vorherigen Kapiteln erläutert.

Einer reinen Trennflächenspurauswertung unterliegen die anschließenden Vorschläge aus der Literatur. Sturzenegger et al. (2011) überträgt das „Circular Window Mapping“ auf die Punktwolken, hier werden manuell die Kluftspuren markiert und ausgezählt. Da die Laserscandaten als Punktwolken aber nicht kontinuierlich sind, sie also keine zusammenhängende Oberfläche aufweisen und somit Datenlücken aufweisen, ist die Identifizierung von Kluftspuren eine sehr ungenaue Methode (Fekete und Diederichs 2013). Die Oberfläche ist nur teilweise sichtbar, Kluftspuren sind in der Punktwolke nicht eindeutig nachzuverfolgen oder teilweise nicht durch das Laserscanning erfasst. Auch Ferrero et al. (2009) schlägt den Transfer der Scanline-Methode und des Window Mappings vor und führt Begriffe wie „Virtual Scanline“ und „Virtual Window Mapping“ ein. Beiden Vorschlägen ist gemein, dass sie traditionelle 2D Methoden der Geländeerfassung auf die Punktwolken in 3D übertragen um die Kluftspurlängen zu analysieren. Unabdingbar ist hierbei, dass die Punktwolke über eine RGB-Farbgebung verfügt, also Fotos über die Punktwolke gelegt werden, da sonst die Identifizierung der Spuren nahezu unmöglich ist. Die Auflösung der Laserscanner kann die kleinsten Unebenheiten einer Kluftspur nur unzureichend erfassen, während Fotoaufnahmen diese Information oft beherbergen und über Farbunterschiede auf die Punktwolken übertragen oder auf ein, auf Grundlage der Punktwolke, erstelltes Mesh. Es zeigt sich, dass man bei der Bestimmung von Trennflächengrößen aus Punktwolken meist noch auf eine manuelle Auswertung angewiesen ist.

Ein weiterer Ansatz ist die Auswertung der Persistenz (bzw. der aufgeschlossenen Größe) der Klüfte in der Gesteinsformation. Dazu werden einzelne Flächen einer entsprechenden Kluft identifiziert und ihre Ausdehnung bestimmt (Strouth et al. 2005). Diese „aufgeschlossene Persistenz“, also erkennbare Flächenausdehnung der Klüfte, markiert die untere Grenze der wahren zugrunde liegenden Kluftpersistenz bzw. Kluftgröße. Zwei Methoden werden dabei unterschieden. Zum einen wird unter der Annahme, dass die aufgeschlossenen planaren Flächen eine rechteckige Form aufweisen, die maximale Länge der Diagonalen des Rechtecks bestimmt. Das geschieht unter der Abschätzung des Flächeninhalts der aufgeschlossenen Kluftfläche. Zum anderen wird die maximale Ausdehnung der („Maximum Dimension“, nach Strouth et al. 2005) als abschätzende Größe herangezogen. Eine Automatisierung dieser Methoden ist bisher nicht erreicht. Die Identifizierung der Kluftgröße auf Grundlage von Kluftspurmessungen ist kompliziert und ungenau, da sie sich nur auf Punktwolkendaten und Fotos beruft. Es ist anzunehmen, dass in Aufschlüssen mit hohem Relief der Gesteinswand die Identifizierung der Kluftgrößen rein auf Grundlage der aufgeschlossenen Kluftflächen ausreichend ist. Die Dimension dieser Kluftfläche entspricht dabei mit großer Wahrscheinlichkeit dem unteren Ende der wahren Kluftflächengrößen.

Im Folgenden werden Möglichkeiten erörtert, mit denen sich aus Punktwolken die Größe der Klüfte evaluieren lassen. Dabei wird besonders Wert auf eine mögliche Automatisierung der Methoden gelegt. Der manuelle Input des Anwenders soll möglichst reduziert werden. Die erste Methode basiert auf der Erkennung potentieller Kluftflächen auf der Aufschlussoberfläche. Flächen werden als Polygone in der Punktwolke über einen Algorithmus bestimmt. Diese werden genutzt, um die maximale Dimension über 2 Parameter zu quantifizieren. Beide Parameter entsprechen der längsten Linie innerhalb des Polygons und der Höhe des Polygons (und somit der sichtbaren Kluftfläche). Eine zweite, alternative Methode zielt weniger auf die maximale Dimension der aufgeschlossenen Klüfte als vielmehr auf eine Analyse von Kluftspurlängen ab. Die Kluftspuren werden dabei nicht innerhalb der Punktwolke erkannt, sondern „künstlich“ aus innerhalb der Punktwolke identifizierten Kluftflächen erzeugt. Die Auswertung dieser erzeugten Kluftspuren erfolgt dann gemäß den in der Literatur vorgegebenen Methoden der Kluftspuranalyse und -auswertung aus Geländemessungen.

### 5.2.2 Berechnung der Länge über eine Triangulation

Zunächst wird eine Methode vorgestellt, mit der die maximale Dimension einer exponierten Kluftfläche in einer Punktwolke identifiziert und ausgewertet werden kann. Dies geschieht zunächst unter Zuhilfenahme der Software SplitFX (Split Engineering LLC 2010) und dessen integrierten Algorithmus zur Erkennung von planaren Flächen in einem 3D-Modell. Mithilfe dieses Algorithmus werden Polygone („Patches“ genannt), die identifizierte planare Flächen umschließen, berechnet. Für die Funktion des Algorithmus ist es nötig, dass die Punktwolke trianguliert ist. Der Algorithmus konstruiert auf dieser Triangulation (oder „Mesh“) Polygone (sogenannte „Patches“), die Flächen in der Punktwolke darstellen. Die Polygone werden durch Gruppieren benachbarter Dreiecke des Meshs über die Gleichheit ihrer Normalenvektoren zu einer Oberfläche, die zusammen am Rand ein Polygon bilden, erstellt (Strouth et al. 2005). Diese Gruppierung oder Zusammenführung erfolgt unter der Anwendung restriktiver Parameter (Split Engineering LLC 2010):

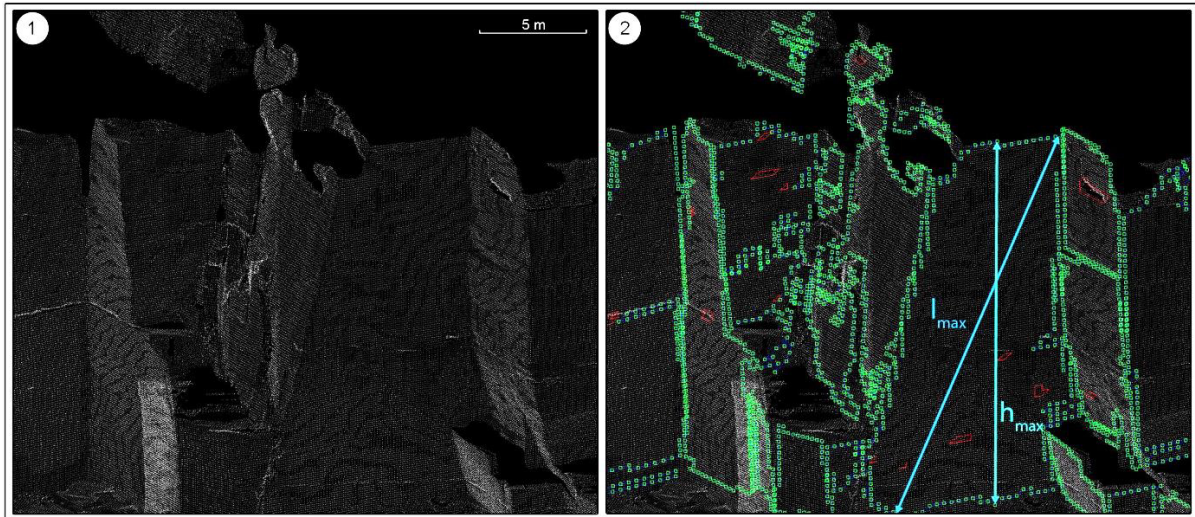
- „Minimum Patch size“ („minimale Patch-Größe“): Der Parameter entspricht der minimalen Größe der Patches aus den gruppierten, benachbarten Dreiecken und wird über die minimale Dreiecksanzahl bestimmt.
- „Maximum neighboring angle“ („maximaler Nachbarswinkel“): Die Differenz in der Orientierung der Normalenvektoren zweier benachbarter Dreiecke, ausgedrückt als Winkeldifferenz in Grad. Benachbarte Dreiecke, die miteinander gruppiert werden, dürfen diesen gewählten Winkelwert des Parameters nicht übersteigen.

Die Patches/Polygone sind unter anderem durch ihre Eckpunkte („Vertices“) definiert. Die Koordinaten der Eckpunkte (x-,y-,z-Koordinaten) werden als „Formatted Vertices“ exportiert. Jede Zeile spiegelt in der Ausgabedatei einen neuen Patch dar, während die Spalten sukzessive die 3 Koordinaten aller Eckpunkte aufführen. Aus diesen Ausgangsdaten werden zwei unterschiedliche Ansätze zur Ermittlung der Länge geschaffen. Das liegt vor allem darin begründet, dass die Frage der Definition der Trennflächenlänge im Aufschluss ungeklärt ist (vgl. Kapitel 2.5.2). Daher kann zum einen die Höhe  $h_{\max}$  der Trennfläche bemessen werden, die der maximalen vertikal aufgeschlossenen (sichtbaren) Höhe der Fläche entspricht, und zum anderen die Länge  $l_{\max}$ , die der einer Linie entspricht, die die maximale Ausdehnung der Fläche widerspiegelt. Die Abbildung 5.13 visualisiert die gemessenen Werte anhand zweier Linien (hellblau). Wünschenswert wäre zudem eine Messung entlang der Streich- und Fallrichtung der Trennfläche, dies konnte im Rahmen der Doktorarbeit aber nicht mehr programmiert werden.

Die Resultate dieser Auswertung geben Hinweise auf Mittelwerte, Standardabweichung und Medianwerte. Zusätzlich werden sie auf ihre statistische Verteilung hin überprüft. Insgesamt werden die Ergebnisse mit neun verschiedenen Verteilungsfunktionen verglichen und einem Kolmogorow-Smirnow-Test (KS-Test) unterzogen. Aus den ermittelten Parametern aller 9 geprüften Verteilungsfunktionen werden jeweils 2500 synthetische Datensätze erzeugt und über den KS-Test ermittelt, ob die Nullhypothese zutrifft oder nicht. Die Summe der Datensätze, die die Nullhypothese nicht ablehnen, wird bestimmt. Je mehr sich diese der vollen Summe von 2500 synthetischen Datensätzen nähert, desto eher stellt die Verteilungsfunktion eine gute Anpassung an die wahre Verteilung der Werte dar (Lai 2012). Verglichen werden die synthetischen mit den empirischen Datensätzen direkt durch den sogenannten p-Wert. Zum Vergleich zweier Datensätze werden die Abstände/Distanzen zwischen den empirischen Daten und der hypothetischen Verteilung bestimmt.



Der p-Wert ist derjenige Anteil der Distanzen der synthetischen Datensätze zur hypothetischen Verteilung, die größer sind als die Abstände der empirischen Daten zur hypothetischen Verteilung. Bei einem kleinen p-Wert ist die hypothetische Verteilung nicht plausibel. Bei der Überprüfung unserer Daten wird ein p-Wert von 10% gewählt, um die Verteilung als plausibel anzusehen. Das heißt, dass maximal 10% der Daten nur schwach mit der hypothetischen Verteilung übereinstimmen dürfen (Clauset et al. 2009). So erhält man schließlich die auf die Daten passende Verteilungs- bzw. Dichtefunktion.



**Abbildung 5.13** Beispielpunktwolke einer Steinbruchwand visualisiert in SplitFX. Bild 1 zeigt die ursprüngliche Punktwolke (Visualisierung der Amplitudenwerte in Graustufen). Nach Triangulation der Punktwolke werden Flächen als Patches/Polygone identifiziert (Bild 2). Die Polygone sind durch die grünen Randmarkierungen in Bild 2 dargestellt. Die aus der Berechnung stammenden Parameter  $l_{\max}$  und  $h_{\max}$  auf Grundlage der Eckpunkte der Polygone sind als Linien (türkis) gekennzeichnet.

Die folgende Aufzählung gibt einen Überblick der notwendigen Arbeitsschritte bei der Auswertung von  $l_{\max}$  und  $h_{\max}$ :

- Import der Punktwolke als ASCII Datei (oder ein anderes kompatibles Dateiformat) in SplitFX.
- Aufteilen der Punktwolke in einzelne Bereiche, um so die Triangulation zu vereinfachen, da ein 2.5D TIN (Triangulated Irregular Network) erzeugt wird. Eine Unterteilung in einzelne Bereiche ist zwingend notwendig, da es sich nicht um eine „echte“ 3D-Triangulation handelt. Das Mesh enthält dann unzählige Fehler. Die Punktwolke wird dazu in einzelne, möglichst koplanare Bereiche unterteilt und die Triangulation für jeden Bereich einzeln durchgeführt.
- Einstellen der Parameter „Minimum Patch size“ und „Maximum neighboring angle“. Diese sind den Gegebenheiten des geschnitten Aufschlusses anzupassen. Anschließend Berechnung der Patches.
- Markieren der Patches nach deren Orientierung im Stereonetz. Jedes Set einzeln anwählen und exportieren.
- Exportieren der Daten als „Formatted Vertices“. Dies exportiert alle Eckpunkte der Patches bzw. Polygone.
- Schritte für alle Teilbereiche wiederholen.
- Berechnung der euklidischen Distanzen der Eckpunkte aller Polygone und Bestimmung von  $h_{\max}$  und  $l_{\max}$ .
- Ausgabe der Ergebnisse im ASCII-Format. Die Ausgabe der Werte folgt der Reihenfolge der Eingabedaten. Jeder Längenwert kann so eindeutig einer Trennfläche zugeordnet werden durch Zusammenführen der Daten.
- Statistische Auswertung der Daten:
  - Histogrammauswertung nach Freedman-Diaconis.
  - Kumulierte Auftragung aller Längenwerte in einem normalen Plot, Semi-Log Plot und Log-Log Plot inklusive der Trendlinien. Auf diese Weise kann eine erste visuelle

Überprüfung des Trends der Verteilung erfolgen. In die Plots werden Trendlinien eingebaut. Korrelieren die Daten gut mit der Trendlinie, können folgende Schlussfolgerungen getroffen werden: In einem normalen Plot wird ein rein linearer Trend der Daten, im Semi-Log Plot ein exponentieller Trend und im Log-Log Plot ein dem Potenzgesetz folgender Trend dargestellt. Zusätzlich wird das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  angegeben. Je näher dieses an 1 liegt, desto besser korrelieren die Daten.

- Eine empirische Verteilungsfunktion.
- Die Daten werden nun mithilfe des Kolmogorow-Smirnow Tests auf die ihnen zugrunde liegende Funktion getestet. Die Verteilung der Daten wird auf ein Potenzgesetz, eine exponentielle (mit und ohne  $x_{min}$ ) und logarithmische Verteilung (mit und ohne  $x_{min}$ ) sowie eine Gamma-, Poisson- und Weibull-Verteilung hin untersucht (siehe Tabelle 5.4).
- Die bestpassendste Wahrscheinlichkeitsverteilung wird gewählt und ihre Parameter als Eingabedaten für ein DFN Modell genutzt.

In der folgenden Tabelle sind für gängige Verteilungstypen die Dichtefunktionen aufgeführt und die jeweils zu bestimmenden Parameter.

Tabelle 5.4 Übersicht über die verwendeten Wahrscheinlichkeitsfunktionen und deren Dichtefunktionen sowie die zu berechnenden Parameter.

Wahrscheinlichkeitsverteilung	Dichtefunktion	Berechnete Parameter
<b>Potenzgesetz (nach Pareto)</b>	$f(x) = \frac{\alpha_w}{x_{min}} \left( \frac{x_{min}}{x} \right)^{\alpha_w+1}$	$x_{min}; \alpha_w$
<b>Exponentialverteilung</b>	$f(x) = \lambda_w * e^{-\lambda_w x}$	$\lambda_w; x_{min}$ nach Bedarf
<b>Logarithmische Normalverteilung</b>	$f(x) = \frac{1}{\sigma_w \sqrt{2\pi} x} \frac{1}{\sigma_w}$	$\sigma_w; \mu_w; x_{min}$ nach Bedarf
<b>Gammaverteilung</b>	$f(x) = \alpha_w \beta_w^{-\alpha_w} x^{\alpha_w-1} e^{-\left(\frac{x}{\beta_w}\right)^{\alpha_w}}$	$\alpha_w; \beta_w$
<b>Weibull-Verteilung</b>	$f(x) = \frac{\alpha_w}{\beta_w} \left( \frac{x}{\beta_w} \right)^{\alpha_w-1} e^{-\left(\frac{x}{\beta_w}\right)^{\alpha_w}}$	$\alpha_w; \beta_w$
<b>Poisson-Verteilung</b>	$f(x) = \frac{\lambda_w^x}{x!} e^{-\lambda_w}$	$\lambda_w$

### 5.2.3 Identifizierung von Flächen in Punktwolken durch einen RANSAC-Algorithmus

Statt Flächen als Polygone über ein Meshing zu identifizieren, können die Flächen auch direkt mithilfe eines RANSAC-Algorithmus in der Punktwolke erkannt werden. Um die durch den Algorithmus zugeordneten Punkte kann so ein Polygon gespannt und zusätzlich die Eckpunkte des Polygons als x-, y-, z- Koordinaten exportiert werden. Die weitere Auswertung erfolgt dann analog zu dem hier bereits vorgestellten Arbeitsablauf.

Ein RANSAC („random sample consensus“) Algorithmus dient allgemein dazu, ein Modell einer Datenreihe anzupassen. Der Algorithmus ist sehr robust in Bezug auf Ausreißer und Fehler im Datensatz (Fischler und Bolles 1981). Der hier genutzte RANSAC Algorithmus ist auf die Erkennung verschiedener einfacher Formen (Flächen, Zylinder, Kugeln, Kegel und Ringe) in Punktwolken ausgelegt (Schnabel et al. 2007). Er ist in die Punktwolkenbearbeitungssoftware CloudCompare integriert. Sechs unterschiedliche Parameter stehen zur Verfügung, um den Algorithmus den Gegebenheiten unterschiedlich gearteter Punktwolken anzupassen (EDF R&D 2014):

- **Primitives:** Es kann ausgewählt werden, welche Formen in der Punktwolke durch den Algorithmus identifiziert werden sollen.

- **Minimum support points per primitive:** Die Mindestanzahl an Punkten aus denen eine Form bestehen soll. Sie hängt auch besonders von der ursprünglichen Punktdichte ab und beeinflusst auch die Größe der identifizierbaren Formen.
- **Maximum distance to primitive:** Maximaler Abstand eines Punktes zur idealen Form des Körpers, in unserem Fall die Entfernung eines Punktes zur idealen Fläche (in Meter).
- **Sampling Resolution:** Auflösung der Beprobung durch den Algorithmus, sollte ungefähr der Auflösung der Punktwolke entsprechen (in Meter).
- **Maximum normal deviation:** Maximale Abweichung in der Orientierung des Normalenvektors der idealen Fläche zum Normalenvektor des untersuchten Punktes (in Grad).
- **Overlooking probability:** Wahrscheinlichkeit, dass kein besserer Punkt während des Durchlaufs des Algorithmus übersehen wurde. Niedrigere Werte führen zu besseren Ergebnissen.

Die Ergebnisse einer Flächendetektion sind exemplarisch in Abbildung 5.24 dargestellt. Der Vorteil dieser Herangehensweise besteht durch das direkte Erkennen von Flächen in der Punktwolke selbst. Eine vorige Triangulation ist nicht notwendig. Der Algorithmus bietet zudem die Möglichkeit die Orientierung der erkannten Flächen als Einfallrichtung und Einfallswinkel, die Eckpunkte eines idealen Vierecks auf der Fläche oder alle Eckpunkte des Polygons, dass die Fläche umrahmt, als x,y,z-Koordinaten zu exportieren.

#### 5.2.4 Berechnung der Parameter $h_{max}$ und $l_{max}$

Die beiden Parameter  $h_{max}$  und  $l_{max}$  werden genutzt um die planare Ausdehnung identifizierter Kluftflächen zu quantifizieren und sind ein Ausdruck für die Persistenz von Klüften. Sie werden bestimmt aus den Eckpunkten (Vertices) der Polygone, die die Kluftflächen im 3D Modell darstellen. Die Polygone werden aus SplitFX oder CloudCompare als ASCII-Dateien exportiert. Dabei werden separate Dateien für jede einzelne Kluftschar erstellt, die über ihre Orientierung voneinander unterschieden werden können. Detailliert werden die beiden Methoden in Kapitel 5.2.2 und 5.2.3 erörtert.

Die Eckpunkte der Kluftschar werden als x,y,z-Koordinaten angegeben. Jeder einzelne Eckpunkt ist eindeutig definiert als  $v_n(x_n, y_n, z_n)$  mit  $n$  als Zahl für den jeweils gewählten Eckpunkt und als Gesamtzahl aller Eckpunkte eines Polygons.

Der Parameter  $h_{max}$  entspricht ungefähr der Höhe einer Kluftfläche an der Wand. Zur Bestimmung wird die Differenz aus denjenigen Eckpunkten des maximalen und minimalen Wertes in z-Richtung (vertikale Dimension der Punktwolke) gebildet:

$$h_{max} = d(v_{maxz}, v_{minz}) = \|v_{maxz} - v_{minz}\|_2 \quad h, d \in R \text{ \& } v \in R^3 \text{ d(korr)} \quad 5.4$$

$$= d * \sin(\epsilon)$$

Zur Berechnung der maximalen Länge oder maximalen Ausdehnung  $l_{max}$  des Polygons wird die euklidische Distanz zwischen allen dem Polygon zugehörigen Eckpunkte gebildet und der Maximalwert bestimmt, der dann  $l_{max}$  entspricht.

$$l_{max} = \max: d(v_x, v_y) = \|v_x - v_y\|_2 \quad \forall x \in \{1, \dots, n\} \cup y \in \{1, \dots, n\}, \quad 5.5$$

$$l, d \in R \text{ \& } v \in R^3, n \in N$$

Die Ergebnisse werden statistisch auf ihre Verteilung hin überprüft und die dazu passende Dichtefunktion mathematisch berechnet..

#### 5.2.5 Quantifizierung der Kluftgröße am Beispielaufschluss

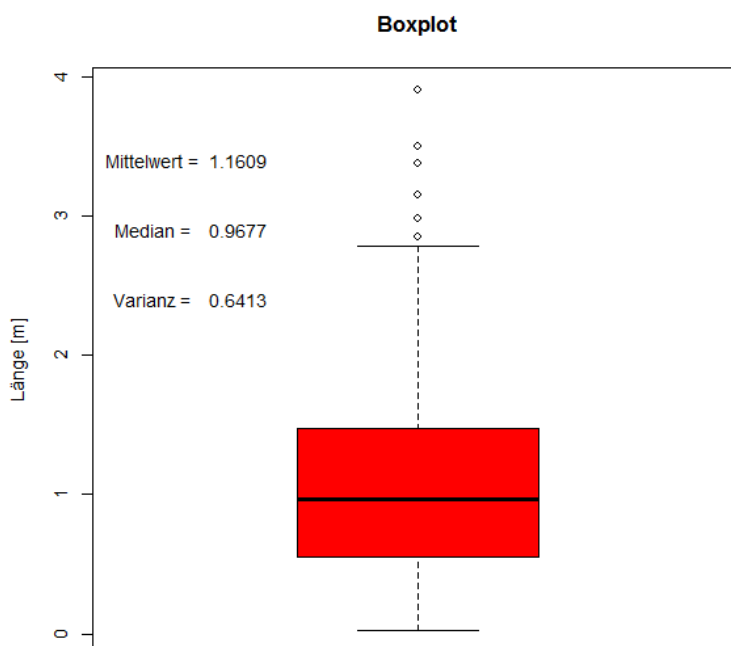
Der Laserscan des Sandsteinbruchs bei Eberbach-Rockenau wird im folgenden Kapitel als Beispiel für die Auswertung der Kluftgröße herangeholt (Kapitel 4.1.2). Zunächst erfolgt eine Bearbeitung der Daten nach dem in Kapitel 5.2.2 beschreibenden Arbeitsablauf aus der Software SplitFX mithilfe einer Triangulation des Ausgangsmodells. Wie erläutert können zwei unterschiedliche Kriterien bei der Berechnung der sichtbaren Trennflächengröße herangezogen werden, eine Auswertung der vertikalen Höhe der Trennfläche oder die maximal sichtbare Länge der Oberfläche (siehe Kapitel

5.2.4). Die Ergebnisse des Arbeitsprozesses werden im Folgenden für eine exemplarisch ausgewählte Kluftschar dargestellt und miteinander verglichen. Die Ergebnisse der übrigen Kluftscharen finden sich im Anhang,

Anschließend wird die in Kapitel 5.2.3 beschriebene alternative Methode zur Detektion von Flächen und ihrer Größenauswertung durchgeführt. Die Arbeitsschritte dazu sind detailliert im nachfolgenden Kapitel aufgeführt.

### **Auswertung der Höhe $h_{max}$**

Basierend auf den Informationen über die Klüfte aus SplitFX, die die Klüfte als Polygone abbilden, werden die Längen der sichtbaren Klüfte aus ihrer vertikalen Höhe ( $h_{max}$ ) berechnet und statistisch ausgewertet. Zunächst wurden Klüfte einer fast vertikal stehenden, nach NE und SW einfallenden Schar (NE-SW) beschrieben (detaillierte Ergebnisse für die beiden anderen Kluftscharen finden sich im Anhang). Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.14 dargestellt. Insgesamt werden 119 Klüfte identifiziert und ausgewertet. Die Höhe der Klüfte erreicht maximal 4 m. Der Mittelwert der Höhe beträgt 1,16 m, zudem gibt es kaum Klüfte, die höher als 1,5 m sind oder kürzer als 0,6 m.



**Abbildung 5.14** Boxplot der nach SW einfallenden Kluftschar (NE-SW) des Steinbruchs Rockenau. Die durchschnittliche Länge bzw. Höhe, da die vertikale Ausdehnung der Kluft  $h_{max}$  gemessen wird, beträgt 1,15 m. Wenige Ausreißer liegen oberhalb der 3 m Marke und erreichen ein Maximum von 4m. Die meisten Kluftlängen schwanken zwischen 0,6 und 1,5 m.

Weitere Ergebnisse der Auswertung sind in Abbildung 5.15 dargestellt. Die Werte werden als Histogramm (a) nach Freedman-Diaconis Klassen, als empirische Verteilungsfunktion (b) und als x-y-Diagramme (c-f) visualisiert, in denen die gemessenen Werte in Rot eingetragen sind. Diese letztgenannten Diagramme dienen der Untersuchung auf einen linearen Trend (c), einen exponentiellen Trend (d, dort ist die y-Achse logarithmisch), einen logarithmischen Trend (e, dort ist die x-Achse logarithmisch) und einem Trend, der einem Potenzgesetz unterliegt (f, beide Achsen sind logarithmisch). Dies ist nur eine erste grobe Annäherung und kann nur einen Hinweis auf die zugrundeliegende Dichtefunktion geben. Zusätzlich ist das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  der jeweiligen Trendlinien (schwarze Linie) angegeben. Der starke Anstieg der Kurve der empirischen Verteilungsfunktion unter b) deutet den überwiegenden Teil an Klüften unter ca. 1.3 m an. Sowohl im normalen linearen Plot als auch im Log-Log Plot ist kein klarer Trend der Werte auszumachen. Der Semi-log Plot unter d) lässt auf einen wahrscheinlich exponentiellen Verlauf schließen.

Zur genaueren Prüfung auf die zutreffende Wahrscheinlichkeitsfunktion werden die Daten einem KS-Test unterzogen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.16 dargestellt. Dort wurde die Verteilung auf ein Potenzgesetz (rot), eine Exponentialverteilung (sowohl mit einem unteren Schwellenwert  $x_{min}$  in violett, ohne  $x_{min}$  in orange), logarithmische Normalverteilung (sowohl mit einem unteren Schwellenwert  $x_{min}$  in grün und ohne  $x_{min}$  in blau), Gammaverteilung (pink), Poisson-Verteilung (türkis) und eine Weibullverteilung (dunkelgrün) geprüft. Anders als in der visuellen Überprüfung zeigt sich, dass die Daten gut über die Paretoverteilung (Potenzgesetz) oder über eine logarithmische Normalverteilung mit einem Mindestwert für  $x$  ( $x_{min}$ ) angenähert werden können. Insgesamt bestehen 2256 der 2500 synthetischen Datensätze den KS-Test für die Paretoverteilung bei der Annahme eines Signifikanzniveaus von 10% und 2445 synthetische Datensätze den KS-Test bei einer logarithmischen Normalverteilung (und 2303 für eine logarithmische Normalverteilung ohne Schwellenwert  $x_{min}$ , die daher ausgeschlossen wird). Obwohl eine Entscheidung zugunsten der logarithmischen Normalverteilung bereits auf Grundlage der erfolgreichen HS-Tests erfolgen kann, werden die Datensätze noch genauer betrachtet. Denn als weiteres Entscheidungskriterium werden nun die  $x_{min}$ -Werte beider Verteilungen herangezogen. Für das Potenzgesetz beträgt  $x_{min} = 0,8526$  m, für die logarithmische Normalverteilung gilt  $x_{min} = 0,0722$  m. Somit bildet die logarithmische Verteilung einen größeren Wertebereich ab, schließt auch kleine Trennflächengrößen ein und ist somit dem Potenzgesetz auch in dieser Hinsicht vorzuziehen.

Den hier aufgezeigten Datensatz an Längenwerten der Trennflächen nähert eine logarithmische Normalverteilung mit einem  $x_{min}$ -Wert von 0,0722 m, einem  $\sigma_w$  von 0,45 und einen  $\mu_w$  von -0,0375 am besten an. Eine Exponentialverteilung der Daten, wie noch visuell auszumachen in Abbildung 5.15, wird durch den durchgeführten KS-Test nicht bestätigt und diese Annäherung schlussendlich verworfen. Nur 211 von 2500 KS-Test besteht die exponentielle Verteilung.

**Tabelle 5.5 Ergebnisse der statistischen Tests nach Kolmogorow-Smirnow (KS-Test) für  $h_{max}$  der Kluftschar NE-SW. Jede Verteilung wurde 2500mal getestet.**

Verteilung	Erfolgreiche KS-Tests	$x_{min}$	$\alpha_w$ (scale)	$\beta_w$ (shape)	$\lambda_w$	$\sigma_w$	$\mu_w$
<b>Potenz</b>	2256	0,8526	2,724				
<b>Exp</b>	0	0,4486			1,16		
<b>Reg Exp</b>	211				1,16		
<b>Log</b>	2445	0,0722				0,45	-0,0375
<b>Reg Log</b>	2303					0,6861	-0,1167
<b>Gamma</b>	0		2,101	1,810			
<b>Poisson</b>	0				1,160		
<b>Weibull</b>	0		2,101	1,810			

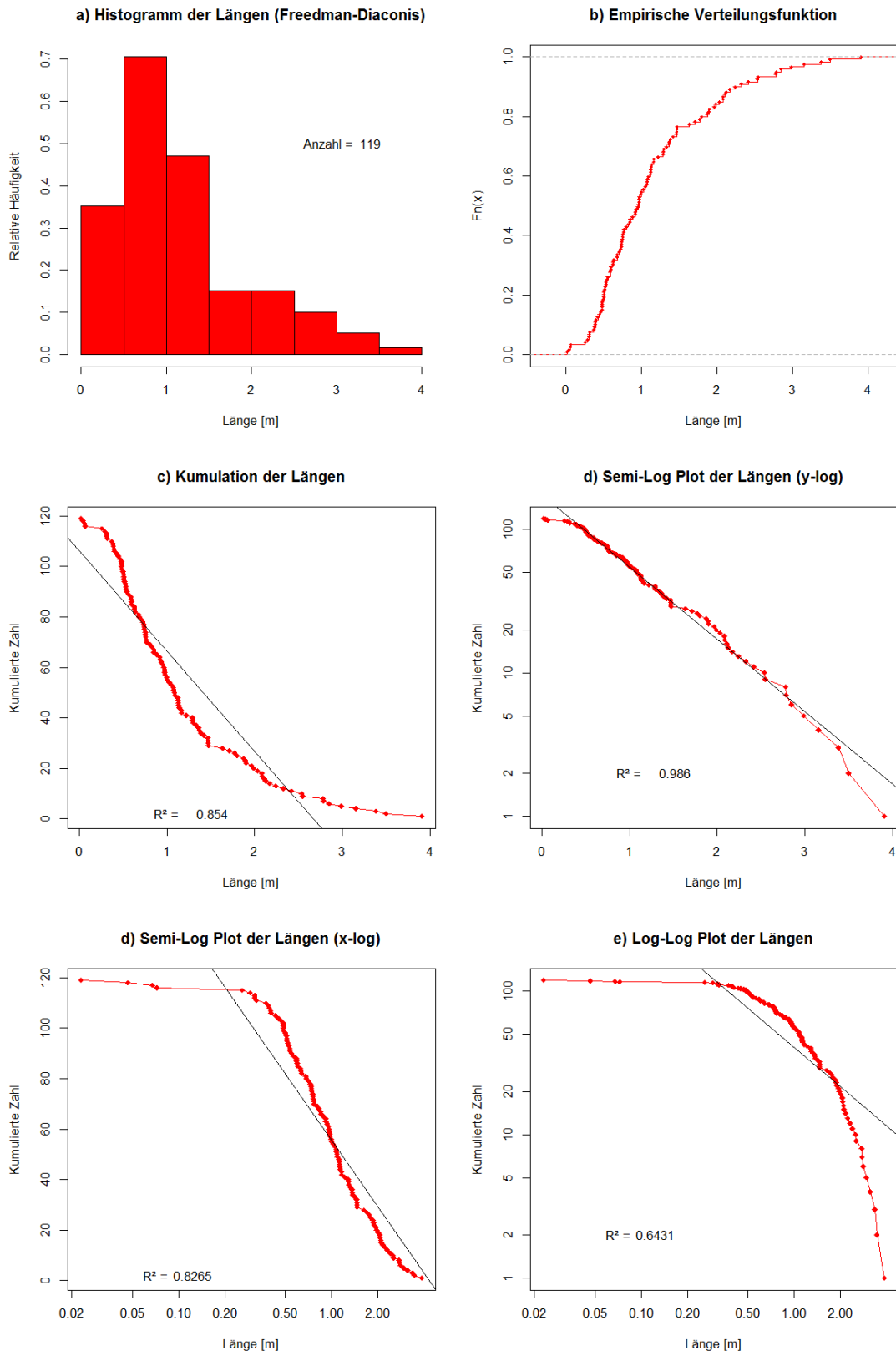


Abbildung 5.15 Statistik der Kluftlängen bzw. Höhen  $h_{\max}$  der Kluftschar NE-SW. Unter a) ist das Histogramm der Werte von  $h_{\max}$  und unter b) die empirische Verteilungsfunktion abgebildet. Beide belegen, dass ein Großteil der Werte im Bereich zwischen 0,5 und 1,5 m (a) bzw. 0,3 und 1,3 m (b) liegen. Dies verdeutlicht die hohe Steigung der empirischen Verteilungsfunktion in diesem Bereich. Die Abbildungen c) bis f) dienen einer ersten, visuellen Abschätzung der möglichen, zugrundeliegenden Dichtefunktion der Werte. So lässt Abbildung c) auf einen linearen, d) auf einen exponentiellen, e) auf einen logarithmischen und f) auf einem dem Potenzgesetz unterworfenen Zusammenhang schließen.

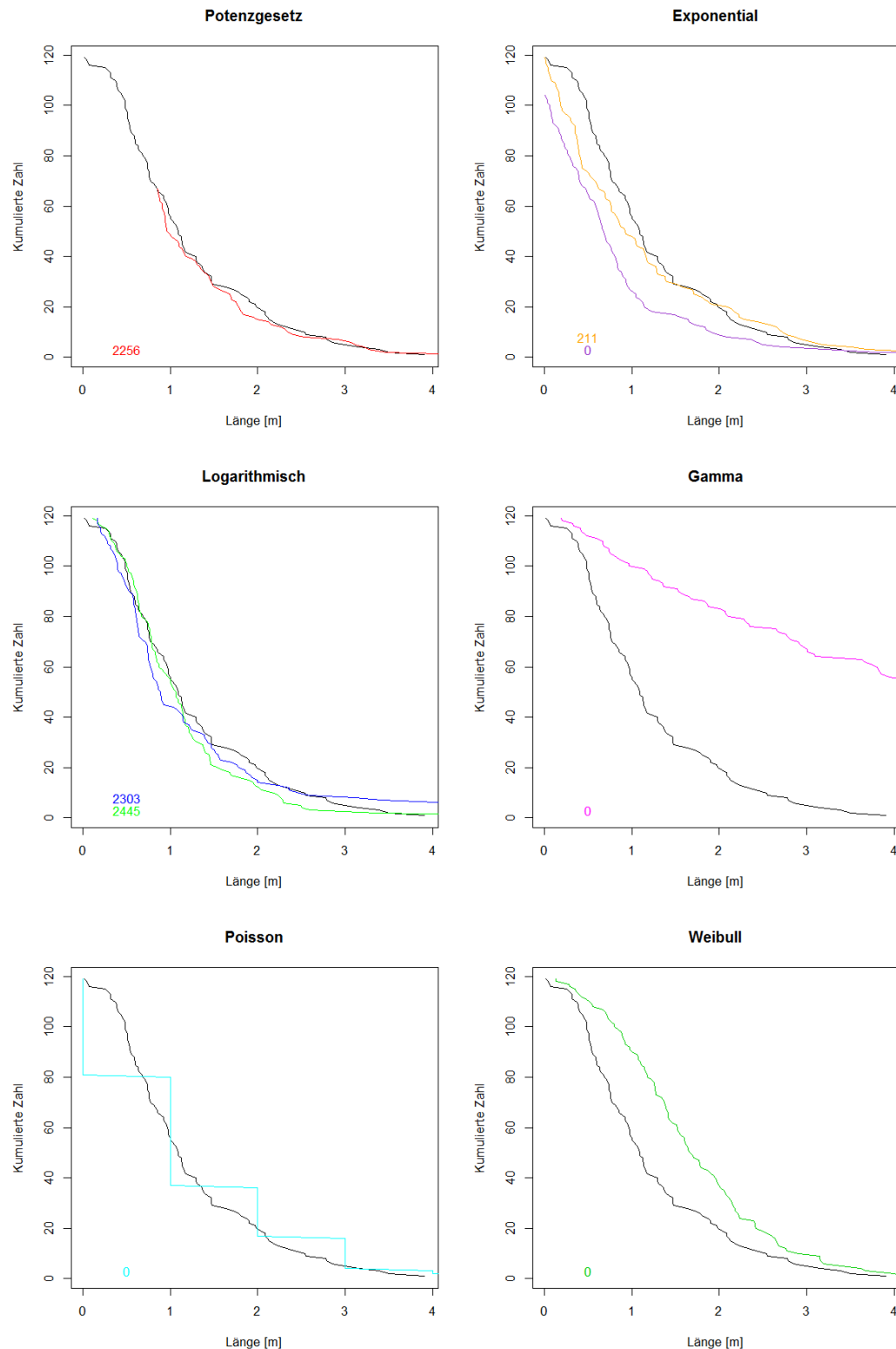
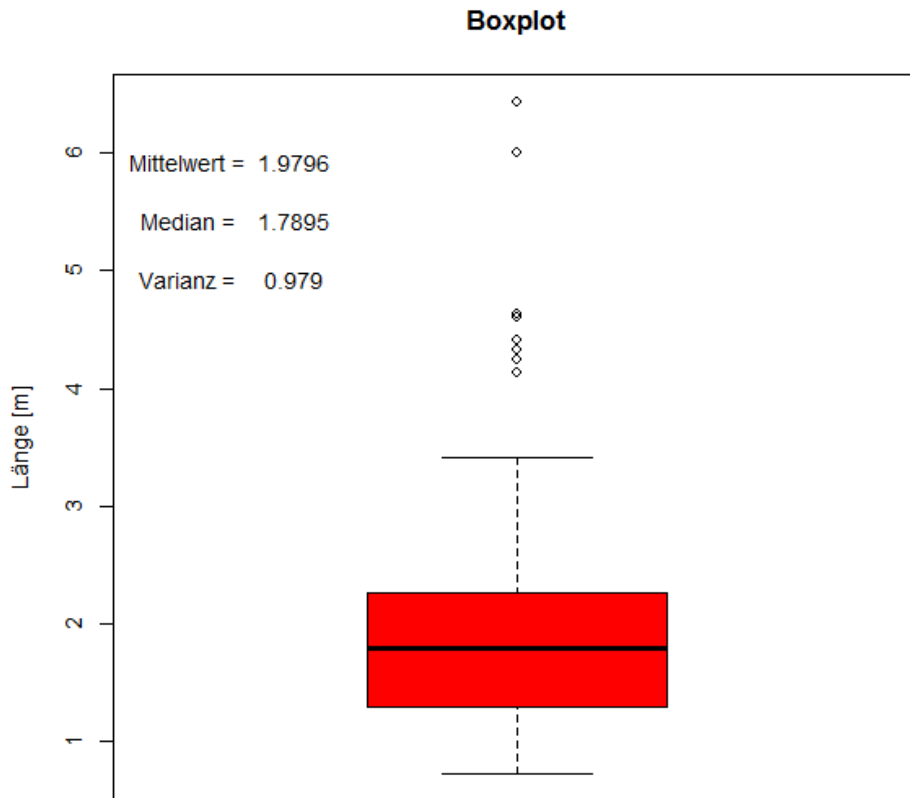


Abbildung 5.16 Ergebnisse des Kolmogorow-Smirnow Tests der Längendaten  $h_{\max}$  der Kluftchar NE-SW. Aufgezeigt ist die Verteilung der gemessenen Daten (schwarz). Auf Grundlage dieser Verteilung wurden Parameter verschiedener möglicher Dichtefunktionen bestimmt und zufällig Datensätze erstellt, die der jeweiligen Dichtefunktion folgen. Diese sind farbig in die Diagramme eingetragen. Sowohl bei der Exponentialverteilung (orange) als auch bei der Logarithmischen Normalverteilung (blau) ist eine zusätzliche Kurve eingezeichnet, die einen berechneten minimalen Schwellenwert  $x_{\min}$  berücksichtigt, um die Funktion besser den Originaldaten zuzuordnen. Die Exponential-, Gamma-, Poisson- und Weibullverteilung zeigen keine Übereinstimmung mit der originalen Verteilung der Daten. Die Anzahl der erfolgreichen KS-Tests (2500 Durchläufe) liegt bei 0 oder maximal 197 für die Exponentialverteilung. Ausschließlich die Logarithmische-Normalverteilung und das Potenzgesetz weisen eine hohe Anzahl erfolgreicher Tests auf.

### **Auswertung der Länge $l_{max}$**

In diesem Abschnitt werden die Längen ebenfalls aus den aus SplitFX exportierten Polygonen bestimmt. Allerdings werden statt der maximalen vertikalen Höhe  $h_{max}$ , die maximale Ausdehnung  $l_{max}$  des Polygons bestimmt und als Längenwert herangezogen. Die Auswertung erfolgt analog zu der Auswertung von  $h_{max}$ . Die Ergebnisse der Auswertung der Länge sind in Abbildung 5.17 und Abbildung 5.18 dargestellt.



**Abbildung 5.17** Boxplot der nach SW einfallenden Kluftschar (NE-SW) des Steinbruchs Rockenau. Die durchschnittliche Länge ( $l_{max}$ ) beträgt 1,97 m. Wenige Ausreißer liegen oberhalb der 4 m Marke und erreichen ein Maximum von 6,5 m. Die meisten Kluftlängen schwanken zwischen 1,5 und 2,3 m.

Die Längen  $l_{max}$  weisen einen Mittelwert von ungefähr 1,97 m. Ein Großteil der Kluftlängen verteilt sich im Bereich von 1,5 und 2,3 m. Wenige Ausreißer reichen über 4 m hinaus bis maximal 6,5 m. Das Histogramm aus Abbildung 5.18 sowie die empirische Verteilungsfunktion belegen diese Aussagen. Ein Großteil der Daten verteilt sich im Bereich von 1 und 3 Meter. Dies zeigt der steile Anstieg der Kurve in Diagramm b und das Maximum der Werte in der Klasse zwischen 1 und 1,5 Meter (a).



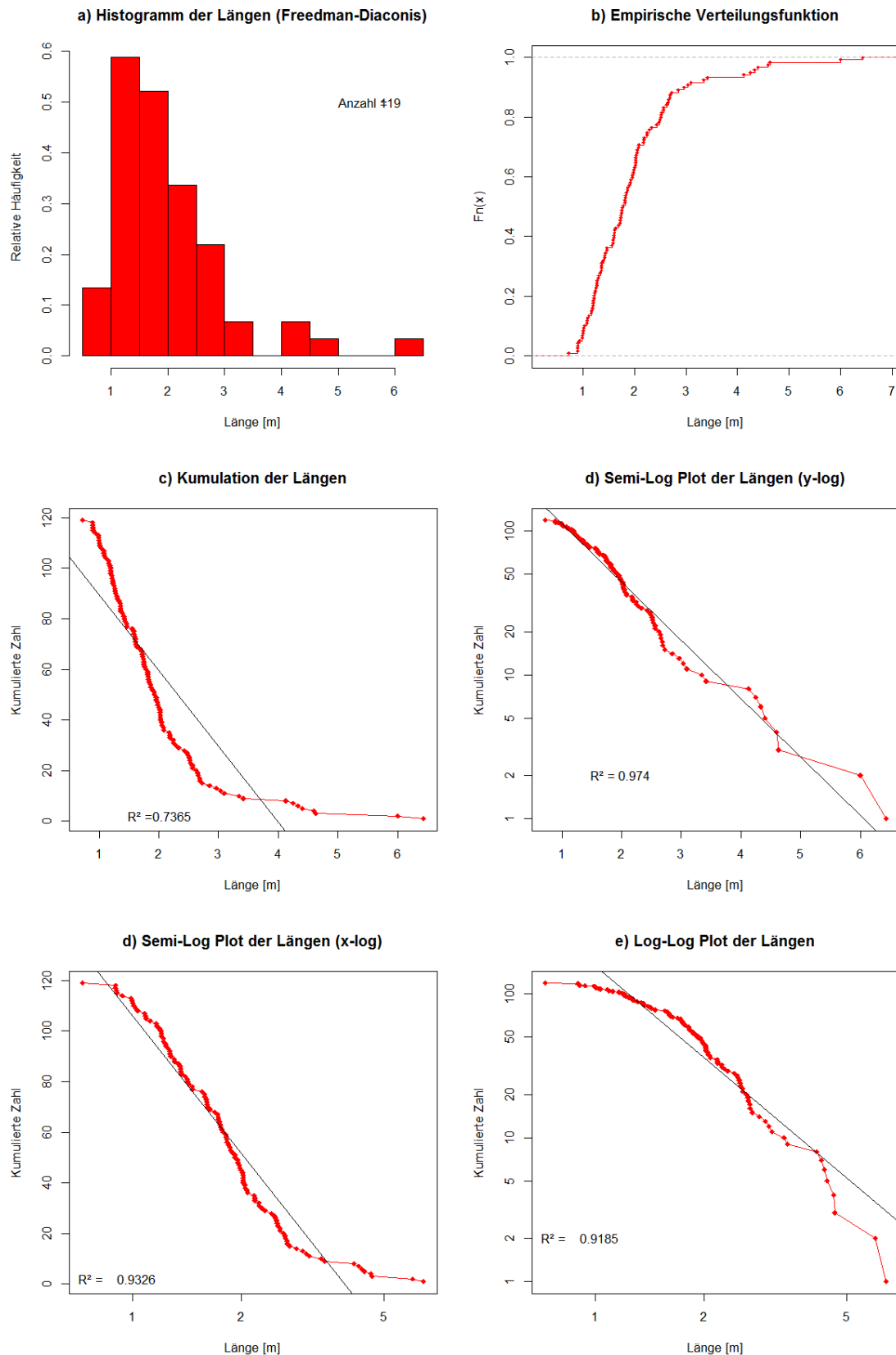


Abbildung 5.18 Statistik der Kluftlängen  $l_{\max}$  der Kluftchar NE-SW. Unter a) ist das Histogramm der Werte von  $l_{\max}$  und unter b) die empirische Verteilungsfunktion abgebildet. Beide belegen, dass ein Großteil der Werte im Bereich zwischen 1 und 3 m liegen. Dies verdeutlicht die hohe Steigung der empirischen Verteilungsfunktion in diesem Bereich. Die Abbildungen c) bis f) dienen einer ersten, visuellen Abschätzung der möglichen, zugrundeliegenden Dichtefunktion der Werte. Sowohl ein exponentieller Trend (d, Bestimmtheitsmaß  $R^2=0,97$ ) oder ein logarithmischer (e,  $R^2=0,9$ ) scheinen möglich.

Die Verteilung der errechneten Kluftlängenwerte  $l_{max}$  wird mit sechs verschiedenen Dichtefunktionen verglichen. Auf Grundlage der bestehenden Datenbasis werden verschiedene Parameter berechnet und aus diesen zufällige Verteilungen, die den Gesetzmäßigkeiten der sechs Dichtefunktionen folgen, erstellt und den Ausgangsdaten gegenübergestellt. Über den Kolmogorow-Smirnow Test wird die Übereinstimmung der zufälligen Verteilungen mit den Ausgangsdaten überprüft. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.19 dargestellt. Sowohl für das Potenzgesetz (2479 von 2500 Tests erfolgreich) als auch für die logarithmische Normalverteilung (2393 bzw. 2404 von 2500 Tests erfolgreich) zeichnet sich eine hohe Übereinstimmung ab. Für das Potenzgesetz wurde ein  $x_{min}$  von 1,7 Metern berechnet, für die Log-Normalverteilung (grün) ein  $x_{min}$  von 0,73 Metern. Die zweite Log-Normalverteilung (blau) kommt ganz ohne Schwellenwert  $x_{min}$  aus. Da das Potenzgesetz aufgrund des Schwellenwertes einen Großteil der Daten nicht abdeckt (knapp 50% der Längenwerte liegen unterhalb 1,7 m, vergleiche dazu auch Diagramm b) in Abbildung 5.18), wird hier die Lognormalverteilung favorisiert. Somit werden die Kluftlängen  $l_{max}$  der Kluftschar NE-SW am besten über eine Lognormalverteilung ohne Schwellenwert  $x_{min}$  abgebildet, diese lässt sich durch die Parameter  $\mu_w = 0,58$  und ein  $\sigma_w = 0,18$  beschreiben.

**Tabelle 5.6 Ergebnisse der statistischen Tests nach Kolmogorow-Smirnow (KS-Test) für  $l_{max}$  der Kluftschar NE-SW. Jede Verteilung wurde 2500mal getestet.**

Verteilung	Erfolgreiche KS-Tests	$x_{min}$	$\alpha_w$ (scale)	$\beta_w$ (shape)	$\lambda_w$	$\sigma_w$	$\mu_w$
<b>Potenz</b>	2479	1,7239	4,002				
<b>Exp</b>	0	1,1629			1,98		
<b>Reg Exp</b>	0				1,98		
<b>Log</b>	2393	0,7252				0,1799	0,5858
<b>Reg Log</b>	2404					0,1799	0,5858
<b>Gamma</b>	0		2,022	4,003			
<b>Poisson</b>	0				1,9796		
<b>Weibull</b>	0		2,022	4,003			

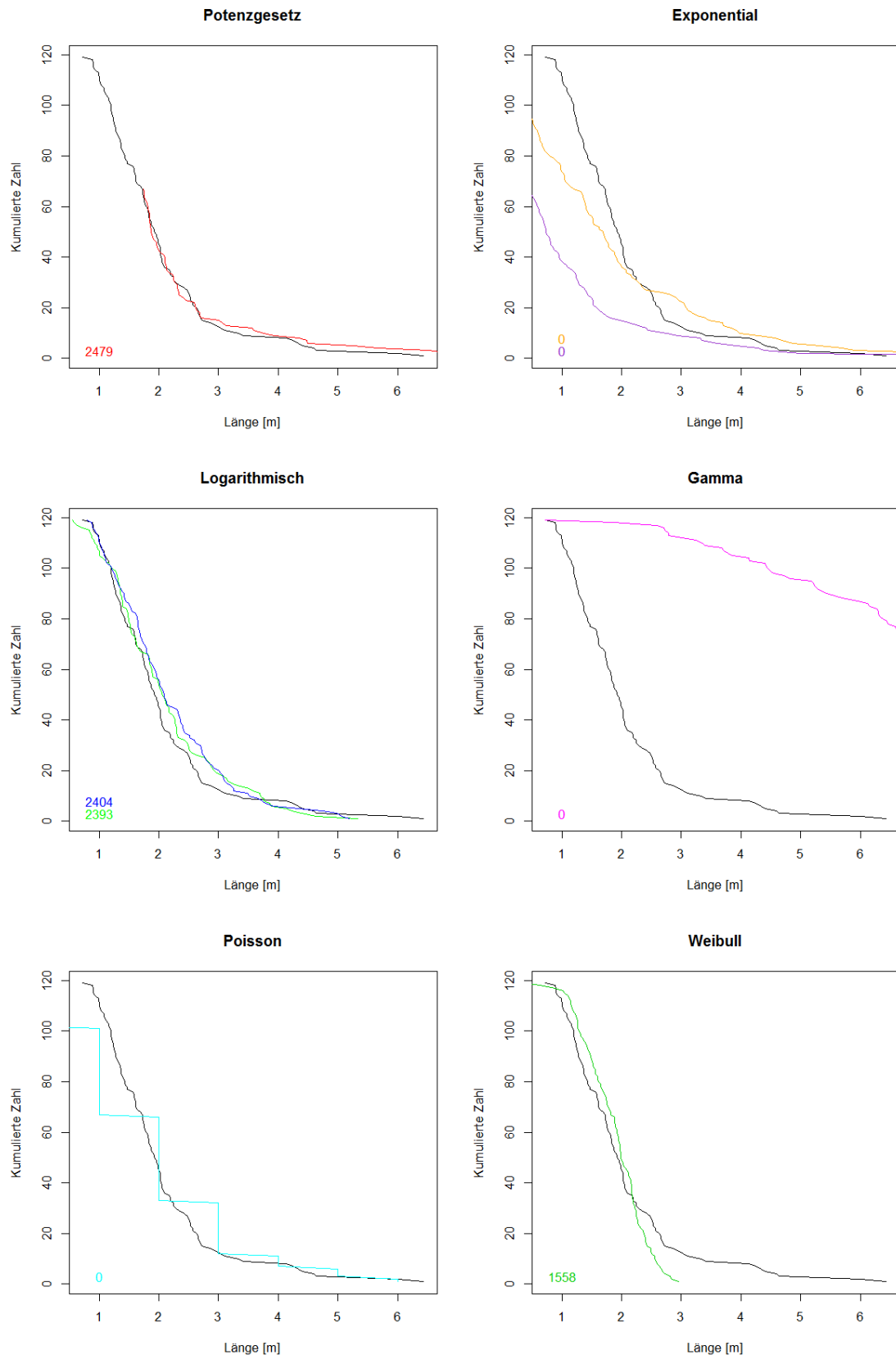


Abbildung 5.19 Ergebnisse des Kolmogorow-Smirnow Tests der Längendaten  $l_{\max}$  der Kluftchar NE-SW. Aufgezeigt ist die Verteilung der gemessenen Daten (schwarz). Die Exponential-, Gamma- und Poissonverteilung zeigen keine Übereinstimmung mit der originalen Verteilung der Daten. Die Anzahl der erfolgreichen KS-Tests (2500 Durchläufe) liegt bei 0. Ausschließlich die Logarithmische-Normalverteilung und das Potenzgesetz weisen eine hohe Anzahl erfolgreicher Tests auf (<2400). Die logarithmische Verteilung ohne Schwellenwert  $x_{\min}$  ist die hier favorisierte Dichtefunktion (blau).

### Vergleich von $h_{max}$ und $l_{max}$

Zwei verschiedene Ansätze wurden dargestellt, um die Länge von Trennflächen aus einer Punktwolke zu bestimmen. Zuerst wurden die vertikal sichtbaren Höhen  $h_{max}$  quantifiziert und danach die maximal erkennbare Ausdehnung einer Trennfläche  $l_{max}$ . Schon per Definition ist ersichtlich, dass stets folgender mathematischer Zusammenhang herrscht:

$$l_{max} \geq h_{max} \quad 5.6$$

Die maximale Ausdehnung einer Trennfläche in der Punktwolke, bzw. des Polygons, entspricht immer mindestens der maximalen, vertikalen Höhe.

Um zwei Längenverteilungen miteinander zu vergleichen, bietet sich die Darstellung aller Werte über die empirische Verteilungsfunktion an (Abbildung 5.20). Die Werte von  $h_{max}$  (schwarz) als auch  $l_{max}$  (rot) sind dort direkt nebeneinander aufgetragen und erlauben eine schnelle, visuelle Einordnung. Beide Kurven weisen einen ähnlichen Verlauf auf, jedoch sind die Werte von  $h_{max}$  im Schnitt um 0,8 m nach unten verschoben, was auch der Differenz beider Mittelwerte der Daten entspricht. Die Steigung beider Verteilungen ist allerdings ähnlich und zeigt somit das gleiche Verhältnis von vielen kleinen Trennflächen zu wenigen großen Trennflächen. Die Verteilung beider Datensätze ist zudem gleich, beide lassen sich durch eine logarithmische Normalverteilung oder über ein Potenzgesetz mit relativ hohem  $x_{min}$  Schwellenwert beschreiben. Im Bereich von 40-70% der Werte (0,4-0,7 der y-Achse  $F_n(x)$ ) nimmt der Abstand beider Verteilungsfunktionen zueinander zu. Die Größe der Flächen (nach  $l_{max}$ ) steigt hier proportional schneller an.

Ab ca. 70%-90% wird der Abstand wieder geringer und fällt sogar unter den mittleren Abstand beider Verteilungen zueinander. Während im oberen Größensegment die Trennflächenlänge  $h_{max}$  relativ stärker ansteigt als bei den  $l_{max}$  Werten, zeigt sich im mittleren Größensegment ein umgekehrter Trend. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Methode der Bestimmung des Parameters  $h_{max}$  am oberen Ende der Verteilung dazu neigt, mehr größere Flächen darzustellen (Abbildung 5.21). Die größten Maximalwerte hingegen liefert  $l_{max}$  und der Abstand zu  $h_{max}$  nimmt in diesem Maximalbereich enorm zu. Für  $h_{max}$  verzeichnen wir einen regelmäßigen Zuwachs der Länge bis etwa 80% der Gesamtmenge an Trennflächen. Danach steigt die Länge sprunghaft an. Für  $l_{max}$  wird bis fast 90% ein konstanter Zuwachs der Länge verzeichnet, die danach aber ebenso sprunghaft ansteigt. Große Kluftlängen sind also eher selten und bilden eine Ausnahme. Sie treten nur vereinzelt auf. Gerade der Bereich unter 0,5 Meter wird durch die Quantifizierung von  $l_{max}$  gar nicht berücksichtigt. Verwertbare Ergebnisse liegen hier erst ab einer Länge von 1 Meter vor. Die Quantifizierung von  $h_{max}$  liefert hingegen 20% Werte unter 0,5 Meter. Im Bereich der maximalen Werte nimmt der Abstand zwischen  $l_{max}$  und  $h_{max}$  überproportional zu. Die Längen nach  $l_{max}$  liefern bis zu 3 Meter größere Werte.

Der Vergleich von  $h_{max}$  und  $l_{max}$  zueinander sagt etwas aus über die Form der aufgeschlossenen Kluftflächen (aber nicht zwangsläufig über die eigentliche Kluftform). Eine Aussage über das Verhältnis der beiden Parameter zueinander bildet beispielsweise der Quotient beider Mittelwerte.

$$f_{lh} = \frac{\overline{l_{max}}}{\overline{h_{max}}} \quad 5.7$$

Für Werte von  $f_{lh}$  gegen 1 ist die Höhe (oder auch vertikale Länge) der Kluft ( $h_{max}$ ) an der Wand gleich ihrer maximalen Ausdehnung ( $l_{max}$ ). In diesem Fall würden die Rechtecke alle vertikal die höchste Kantenlänge aufweisen. Je größer der Quotient, desto breiter werden die Rechtecke (ihre horizontale Ausdehnung nimmt zu). Abbildung 5.13 veranschaulicht diesen Sachverhalt. Der Quotient  $f$  der beiden Parameter ist relativ gering, die aufgeschlossene Kluftform entspricht einem stehenden Rechteck, bei dem die vertikale Kantenlänge beträchtlich größer ist als die horizontale Länge. Würde bei konstantem  $h_{max}$  der Parameter  $l_{max}$  steigen, dann würde sich die Form sukzessive in ein Quadrat ( $\overline{l_{max}}/\overline{h_{max}} = 1,414$ ) und schlussendlich in ein liegendes Rechteck mit einer langen horizontalen

Kante ändern. In unserem Beispielaufschluss liegt  $f$  bei **1,7**. Somit bestätigt sich, dass ein Großteil aller sichtbaren Klüfte als liegende Rechtecke aufgeschlossen ist.

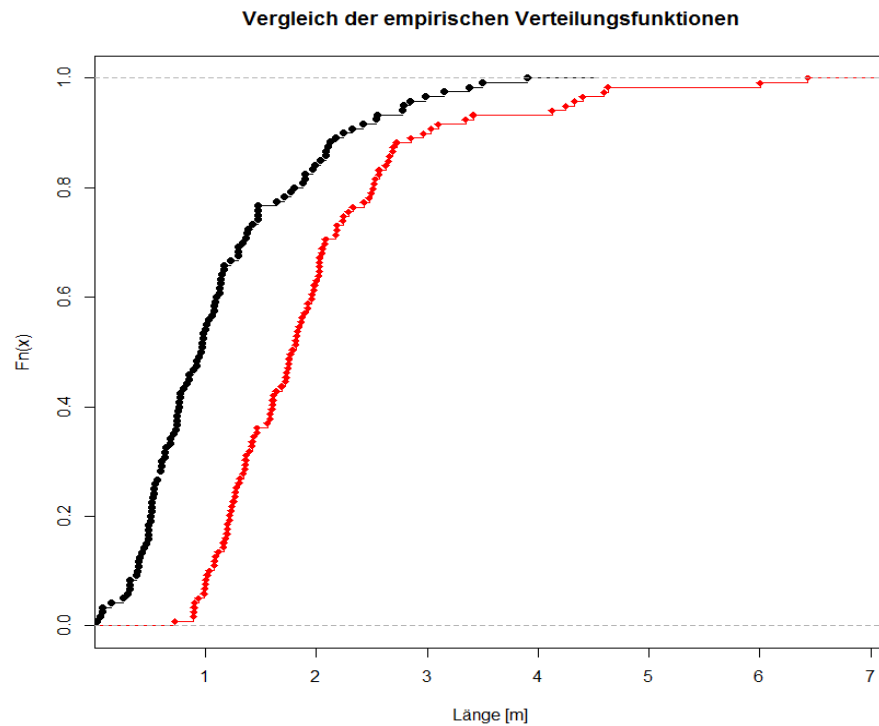


Abbildung 5.20 Darstellung der beiden Kluftlängenparameter  $h_{\max}$  (schwarz) und  $l_{\max}$  (rot) als empirische Verteilungsfunktionen. Die Verteilung der Längen ist ähnlich, jedoch liegen die Werte von  $h_{\max}$  konstant unter denen von  $l_{\max}$ . Im Mittel unterscheiden sie sich um 0,8 Meter.

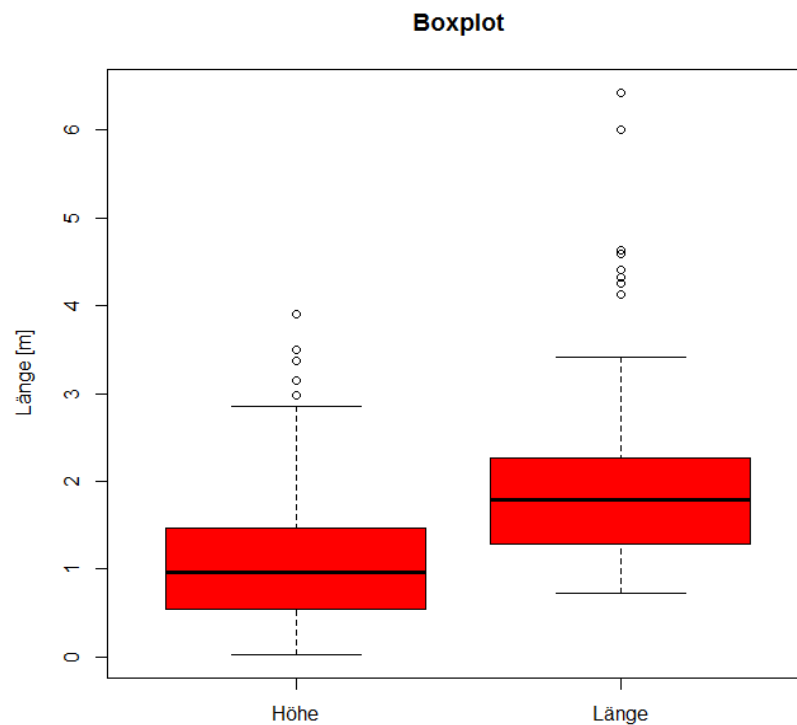


Abbildung 5.21 Vergleichende Boxplots der Höhen  $h_{\max}$  und der maximalen Ausdehnung oder Länge  $l_{\max}$ . Die Werte der Länge liegen konstant über denen der Höhe.

### Auswertung der Flächengröße

Nach (Strouth et al. 2005) kann auch die Flächengröße einzelner Klüfte aus der Punktwolke zur Quantifizierung der Kluftgröße herangezogen werden. Bei der Identifizierung von Flächen in der Punktwolke (durch SplitFX) werden neben den Eckpunkten auch die Flächengrößen der gebildeten Polygone bestimmt. Die Ergebnisse der Kluftschar NE-SW, die exemplarisch ausgewählt wurde, und ihrer Flächengrößen sind in diesem Kapitel aufgeführt.

Die durchschnittliche Flächengröße beträgt 0,6811 m (Abbildung 5.22). Die Verteilung der Flächen lässt sich entweder über ein Potenzgesetz mit hohem Schwellenwert  $x_{min}$  (Tabelle 5.7) beschreiben (Abbildung 11.14) oder optimaler über eine logarithmische Verteilung, da dort der Schwellenwert nicht oberhalb des Mittelwertes aller Daten liegt (Tabelle 5.7).

Tabelle 5.7 Ergebnisse der statistischen Tests nach Kolmogorow-Smirnow (KS-Test) für die Flächengrößen der Kluftschar NE-SW. Jede Verteilung wurde 2500mal getestet.

Verteilung	Erfolgreiche KS-Tests	$x_{min}$	$\alpha_w$ (scale)	$\beta_w$ (shape)	$\lambda_w$	$\sigma_w$	$\mu_w$
Potenz	2470	0,7773	2,4219				
Exp	975	1,3453			0,6811		
Reg Exp	478				0,6811		
Log	2245	0,0831				0,7619	-0,8639
Reg Log	2259					0,7619	-0,8639
Gamma	0		0,4593	0,6744			
Poisson	0				0,6811		
Weibull	0		0,4593	0,6744			

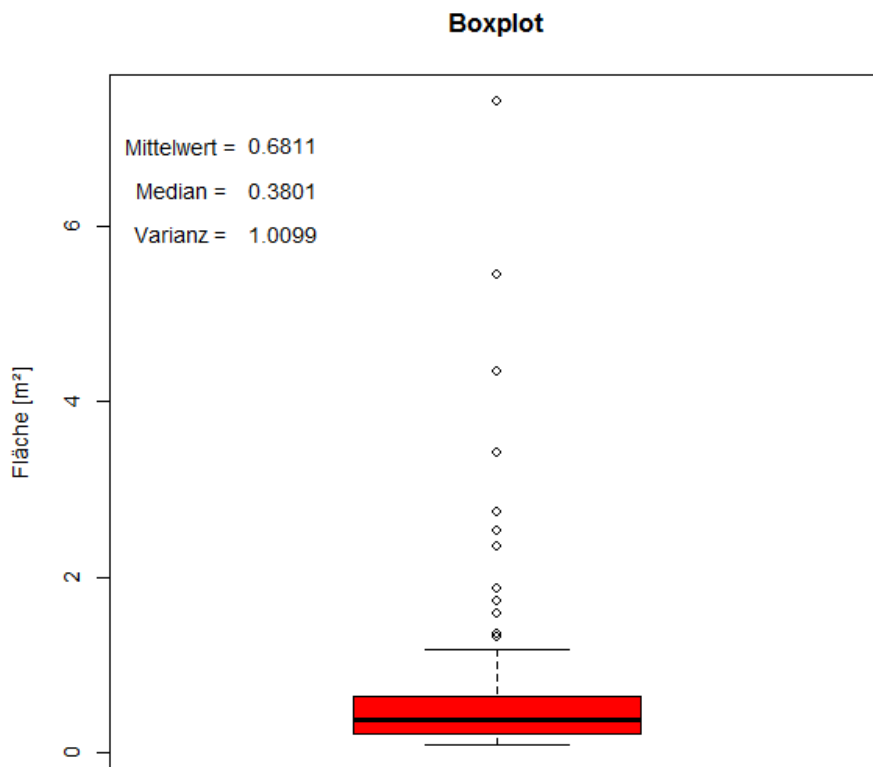


Abbildung 5.22 Boxplot der nach SW einfallenden Kluftschar (NE-SW) des Steinbruchs Rockenau. Die durchschnittliche Flächengröße  $A$  beträgt 0,68 m. Wenige Ausreißer liegen oberhalb der 4 m Marke und erreichen ein Maximum von 7,5 m. Die meisten Flächeninhalte schwanken zwischen 0,3 und 0,8 m.



Aus einem Vergleich der Flächeninhaltsdaten und den bereits ermittelten Längen von  $l_{max}$  lassen sich wieder Rückschlüsse auf die Form der Flächen im Aufschluss ziehen. Mathematisch leiten sich aus der gegebenen Flächengröße verschiedene geometrische Formen ab, darunter Rechtecke verschiedener Seitenverhältnisse und Quadrate. Zu diesen Formen kann die Länge ihrer Diagonale berechnet werden. Der Parameter  $l_{max}$  spiegelt in dem Sinne nichts anderes wider, als die Diagonale einer geometrischen Form unter der Annahme, dass diese Rechtecke sind. In Abbildung 5.23 sind die Flächeninhalte (schwarz), die Längen  $l_{max}$  (rot) und zugehörige Diagonalen 3er geometrischer Formen dargestellt. Liegen die Längen der Diagonalen der geometrischen Form auf denen der Länge  $l_{max}$ , drückt diese geometrische Form am besten die zugrunde liegenden Flächen aus. So lässt sich über diese Methode eine Aussage über die mögliche Form bzw. Seitenverhältnisse von aufgeschlossenen Klüften machen (ähnlich wie das Verhältnis  $f_{lh}$ ). In unserem Beispiel ähneln die Flächen im Mittel einem Rechteck mit einem Seitenverhältnis zwischen 2:1 und 3:2.

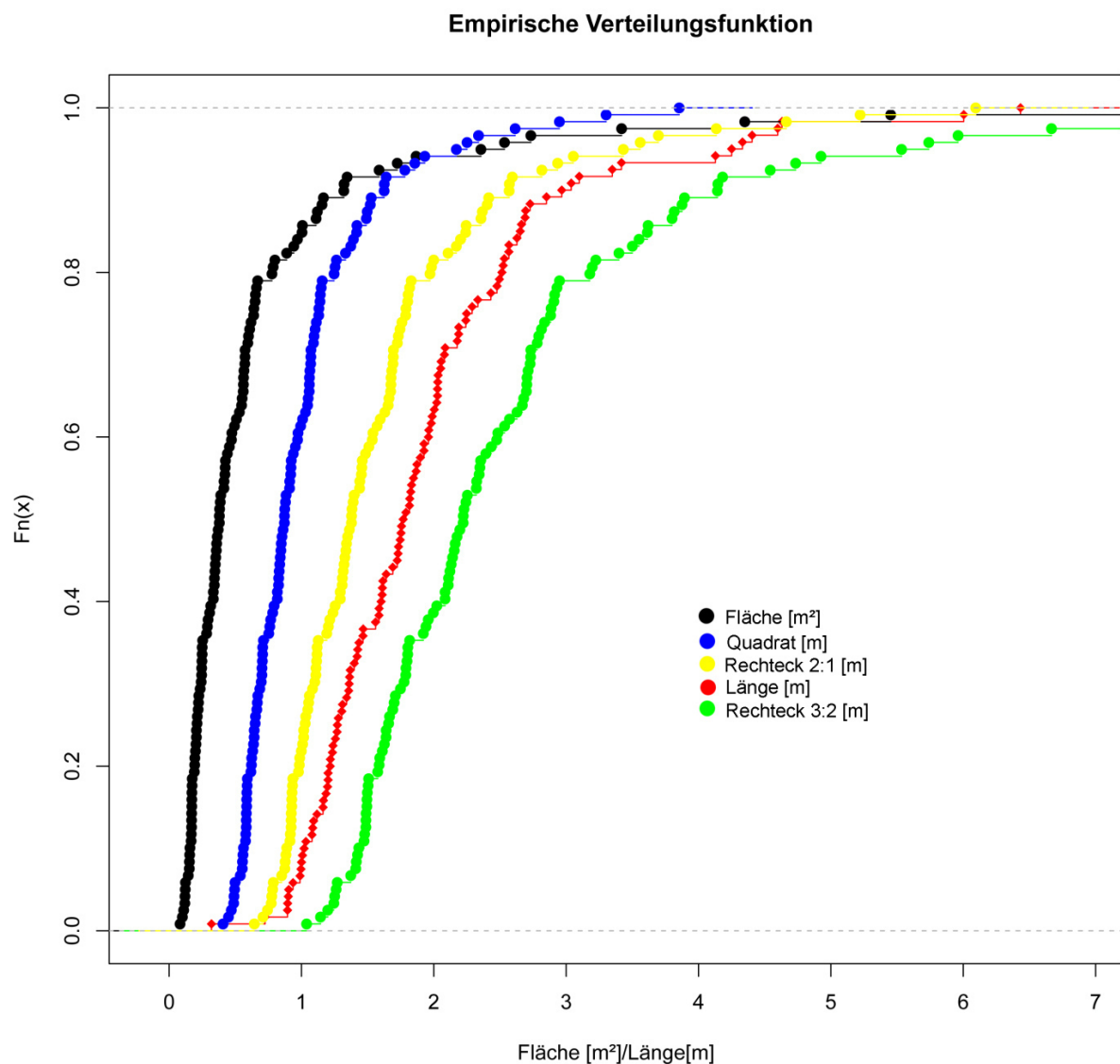


Abbildung 5.23 Vergleich der Verteilungsfunktion der Fläche (schwarz), der daraus berechneten Diagonallängen für unterschiedliche, angenommene Geometrien (blau, gelb, grün) und der ursprünglich berechneten Länge  $l_{max}$  (rot).

#### **Abschätzung der Kluftgröße aus $l_{max}$**

Statt die schon aus SplitFX ermittelten Flächen, die auf Grundlage der Größe der erkannten Polygone berechnet werden, kann auch aus den bestimmten Parametern  $h_{max}$  oder  $l_{max}$  eine zugehörige Flächengröße quantifiziert werden. Die Annäherung der Flächengröße kann unter den Annahmen erfolgen, dass die Klüfte kreisförmig oder viereckig sind. Sollte eine Kluft kreisförmig sein, so hätte

theoretisch die im Gelände sichtbare, offengelegte Fläche in ihrer maximalen Ausdehnung mindestens die Größe des Durchmessers des zugrunde liegenden Kreises. Somit gilt:

$$d_k = l_{max} = 2r \quad 5.8$$

Mit  $d$  als Durchmesser und  $r$  als Radius des Kreises. Die Fläche  $A_k$  des Kreises ergibt sich zu:

$$A_k = \pi r_k^2 = \pi \left( \frac{l_{max}}{2} \right)^2 \quad 5.9$$

Die Formel gilt unter der Annahme, dass der gemessene Parameter  $l_{max}$  der Diagonalen eines Vierecks entspricht. Die durch SplitFX als Flächen erkannten Polygone haben meistens eine solche viereckige Form und sind als Rechtecke ausgebildet. Die längste Ausdehnung entlang einer Linie entspricht dann meist einer Diagonalen durch dieses Rechteck. Auf diese Weise ist es nachvollziehbar den Parameter  $l_{max}$  zur Berechnung der Größe dieser Flächen heranzuziehen. Verschiedene Seitenverhältnisse können für die zugrundeliegenden Vierecke gewählt werden, die die Kluftflächen repräsentieren sollen. Exemplarisch werden Formeln vierer Seitenverhältnisse vorgestellt und die zugehörigen Ergebnisse für alle Kluftscharen berechnet.

- Seitenverhältnis 1:1 (Quadrat):  $A_Q = \frac{l_{max}^2}{2}$
- Seitenverhältnis 2:1 (Quadrat):  $A_Q = 2 * \frac{l_{max}^2}{5}$
- Seitenverhältnis 3:2 (Quadrat):  $A_Q = 6 * \frac{l_{max}^2}{13}$
- Seitenverhältnis 4:1 (Quadrat):  $A_Q = 4 * \frac{l_{max}^2}{17}$

Unabhängig von der Methode zur Berechnung einer Fläche, ob direkt über die Flächengröße der Polygone aus SplitFX oder über die Berechnung der maximalen Ausdehnung  $l_{max}$  bzw.  $h_{max}$ , bestätigt sich der Trend, dass die Kluftchar NE-SW die geringste Größe aufweist. Die WNW-ESE Schar weist durchgehend die höchsten Werte auf. Die Methode der Annäherung der Flächen liefert die mit Abstand größten Werte. So erreichen die Flächen der WNW-ESE Schar bis zu 5,37 m². Die zweitgrößten Flächen werden bei der Annäherung als Quadrate erreicht. Rechtecke mit steigendem Seitenverhältnis weisen kleinere Flächengrößen auf. An die ursprüngliche Flächengröße, die SplitFX aus den Polygonen berechnet hat, kommen in unserem Fall nur Rechtecke mit einem Seitenverhältnis von 4:1 heran. Eine Annäherung als Ellipsen erweist sich als schwierig. Einzig auf Basis der Rechtecke können Ellipsen angenähert werden. Die Ergebnisse unterscheiden sich aber nur unwesentlich von denen der Rechtecke. Darum wird an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen.

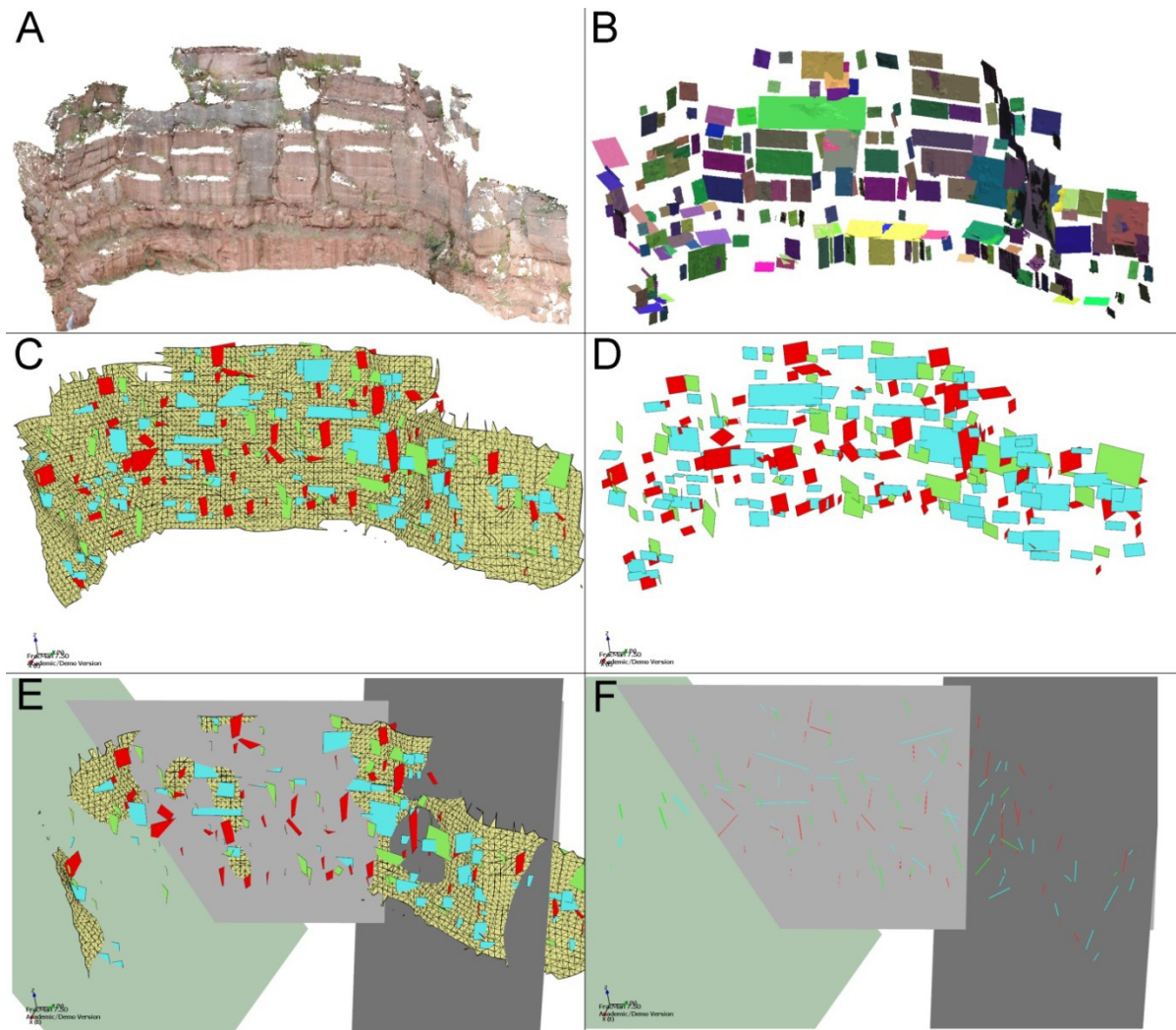
**Tabelle 5.8 Ergebnisse der Berechnung der Flächengrößen im Steinbruch Rockenau. Auf Grundlage des Parameter  $l_{max}$  wurden die Flächeninhalte abgeleiteter Kreise, Quadrate und Rechtecke (Seitenverhältnis 2:1, 3:2 und 4:1) berechnet. Zur Einordnung der Werte sind auch die aus SplitFX ermittelten Flächengrößen, die auf Auswertung der Polygonflächen basieren, angezeigt. Die WNW-ESE Schar zeigt durchgehend die höchsten Flächeninhalte, während die NE-SW Schar die kleinsten Flächen aufweist.**

Kluftchar	$h_{max}$ [m]	$l_{max}$ [m]	Kreisradius [m]	A Kreis [m²]	A Quadrat [m²]	A Rechteck 2:1 [m²]	A Rechteck 3:2 [m²]	A Rechteck 4:1 [m²]	SplitFX [m²]
NE-SW	1,15	1,97	0,98	3,03	1,93	1,55	1,78	0,91	0,68
WNW-ESE	2,08	2,62	1,31	5,37	3,42	2,74	3,16	1,61	1,5090
NW-SE	1,41	2,24	1,12	3,94	2,51	2,01	2,32	1,18	1,284

### 5.2.6 Quantifizierung der Kluftgröße aus konstruierten Kluftspurlängen

Zusätzlich zu der bisher vorgestellten Methode die Trennflächengröße aus Punktwolken über ihre maximale Ausdehnung (mithilfe von  $l_{max}$  und  $h_{max}$ ) zu quantifizieren, wird nun versucht aus den dreidimensionalen Modellen die „Trennflächenspurlänge“ bzw. „Kluftspurlänge“ zu bestimmen. Dieser Ansatz setzt sich aus verschiedenen Arbeitsschritten zusammen und nimmt generell Bezug auf die Methodik des „Circular Window Mappings“ (Zhang und Einstein 1998). Die Umsetzung erweist sich allerdings als schwierig, da Kluftspuren nicht direkt aus den Punktwolkeninformationen gewonnen werden können. Stattdessen werden identifizierte Klüfte als Flächen abgebildet und dann mit einer weiteren Hilfsfläche, die der Böschungsfäche im Aufschluss entspricht, verschnitten. Die sich daraus ergebenden Schnittlinien werden als künstliche Kluftspuren deklariert und für das Circular Window Mapping genutzt. Die Berechnungen sind in Kapitel 2.5.5 erläutert. Die Arbeitsschritte werden im Folgenden detailliert aufgelistet:

1. Über einen RANSAC-Algorithmus (siehe Kapitel 5.2.3) werden die Trennflächen als viereckige Polygone identifiziert. Zusätzlich zur Information der vier Eckpunkte ist auch die Orientierung dieser Fläche im Raum bekannt.
2. Aus den Eckpunkten werden Länge und Breite der Flächen, der zugehörige Mittelpunkt der Fläche und deren Seitenverhältnis (Aspect Ratio) berechnet.
3. Über diese Informationen können die Flächen in Fracman importiert werden. Sie bilden so exakt die durch den RANSAC-Algorithmus erkannten Flächen ab (Abbildung 5.24, B+C).
4. Die Trennflächen werden anhand ihrer Orientierung in einzelne Trennflächenscharen (Sets) unterteilt (Abbildung 5.24, D).
5. Entlang der Aufschlusswand und durch die Trennflächen wird eine Hilfsfläche konstruiert (Traceplane). Bei veränderlicher Orientierung der Aufschlusswand werden entsprechend mehrere Flächen konstruiert bis der gesamte Bereich abgedeckt ist (Abbildung 5.24, E).
6. Die Trennflächen werden mit der Fläche verschnitten und ergeben die Kluftspuren. Es entsteht eine Tracemap, ein Planar auf dem die Kluftspuren verzeichnet sind (Abbildung 5.24, F).
7. Über ein in Fracman integriertes Tool („Trace Length Fracture Size“) können nach Formel 2.8 die durchschnittlichen Kluftspurlängen  $\hat{\mu}_l$  berechnet werden. Es ist die Anwendung des Circular Window Mappings. Das Mapping Window kann hierbei frei auf der Tracemap unter Variation der Größe (Radius des Kreises) lokalisiert werden (Golder Associates 1999-2015).
8. Über Mehrfachmessungen und Mittelwertbildung der Variable  $\hat{\mu}_l$  kann der gewünschte Wert  $\mu_l$  bestimmt werden. Das Ergebnis ist der Mittelwert der Dichtefunktion der Kluftspurlängen  $f(l)$ .



**Abbildung 5.24** Veranschaulichung der Arbeitsschritte zum Transfer der durch einen RANSAC-Algorithmus identifizierten Flächen in Fracman zur weiteren Bearbeitung. In diesem Fall werden Kluftflächen mit sogenannten „Tracemaps“ verschnitten, um Kluftspuren zu erstellen. Diese werden für eine Quantifizierung der Kluftspurlängen benötigt.

**A:** Ausgangspunktwolke (in CloudCompare), visualisiert in RGB Farben. **B:** Durch den RANSAC Algorithmus identifizierte Flächen in der Punktwolke. **C+D:** Importierte Flächen aus B in Fracman. Die Flächen wurden nach ihrer Orientierung in Scharen aufgeteilt und entsprechend koloriert (blau = WNW-ESE, rot = NE-SW, grün = NW-SE). Die Punktwolke wurde in C als Mesh (bzw. DEM) in Fracman hinzugefügt. **E:** Erstellung der 3 Tracemaps entlang der Aufschlusswände (dunkelgrau: Nordflanke, grau: Westflanke, graugrün: Südflanke). **F:** Tracemaps mit Kluftspuren aus der Verschneidung mit den 3 Kluftscharen.

Neben dem Wert  $\mu_l$  kann auch direkt die Verteilung der Kluftspurlängen bestimmt werden. Denn Punkt 5) der Arbeitsschritte liefert bereits alle vorkommenden, aber nicht aus einem „Window Mapping“ stammenden, Kluftspurlängen. Diese Verteilung wird im Folgenden als  $h(l)$  bezeichnet mit dem Mittelwert  $\mu(h)_l$ . Im Gegensatz zu  $\mu_l$  berücksichtigt  $\mu(h)_l$  alle erstellten Kluftspuren.

Die vorgestellten Arbeitsschritte werden am bekannten Beispielaufschluss Rockenau durchgeführt. Die Parameter des RANSAC-Algorithmus werden den Gegebenheiten des Aufschlusses angepasst. In diesem Fall sind die in Tabelle 5.9 aufgeführten Parameter gewählt, um der Punktwolke des Aufschlusses gerecht zu werden.

**Tabelle 5.9** Gewählte Parameter für den RANSAC Algorithmus zur Identifizierung der Flächen in der Punktwolke des Steinbruchs Rockenau.

<b>Minimum support points per primitive</b>	<b>100</b>
<b>Maximum distance to Primitive</b>	<b>0,15</b>
<b>Sampling Resolution</b>	<b>0,07</b>
<b>Maximum normal deviation</b>	<b>10°</b>
<b>Overlooking Probability</b>	<b>0,001</b>

Insgesamt 234 Flächen werden mit diesen Einstellungen durch den RANSAC-Algorithmus identifiziert. Detaillierte Ergebnisse finden sich im Anhang. Wie bereits bei der Berechnung der Länge aus SplitFX mithilfe der Werte  $h_{max}$  und  $l_{max}$  werden auch hier 3 unterschiedliche Kluftscharen aufgrund ihrer Orientierung unterschieden. Eine nach NE-SW, ein NW-SE und ein WNW-ESE einfallende Schar. Drei Flächen (Traceplanes) werden entlang der 3 Flanken des Aufschlusses im Norden, Westen und Süden, erzeugt und mit den Trennflächen verschnitten. In der folgenden Tabelle (Tabelle 5.10) ist die Anzahl der entstehenden Kluftspuren für jede der 3 Flächen (Nordflanke, Südflanke, Westflanke) dokumentiert.

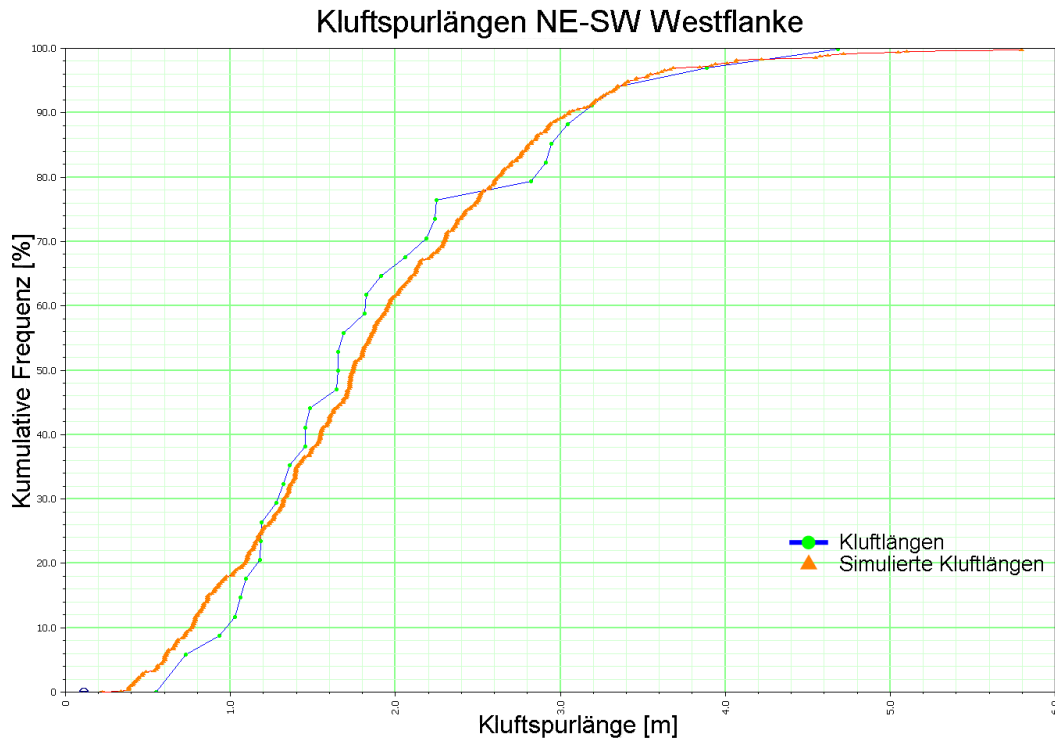
**Tabelle 5.10** Ergebnisse der Auswertung aller erkannten und mit der “Tracemap” verschnittenen Trennflächenspuren. Die Ergebnisse sind somit nicht durch eine Window Mapping Methode korrigiert. Die Ergebnisse sind bereits um die aus einer zu geringen Anzahl an Ausgangsdaten (Anzahl <10) berechneten Werte bereinigt.

	NE-SW			WNW-ESE			NW-SE		
	Anzahl	$\mu(h)_i$ [m]	$\sigma(h)_i$ [m]	Anzahl	$\mu(h)_i$ [m]	$\sigma(h)_i$ [m]	Anzahl	$\mu(h)_i$ [m]	$\sigma(h)_i$ [m]
Westflanke	34	1,9157	0,9485	20	2,6528	2,2178	28	1,7981	0,9471
Südflanke	5	-	-	13	1,4114	1,1471	13	2,0191	1,4099
Nordflanke	16	1,9162	0,8932	20	1,9299	1,0798	4	-	-
Mittelwert		<b>1,9160</b>	0,9209		<b>1,9980</b>	1,4816		<b>1,9086</b>	1,1785

Zunächst werden die Ergebnisse aller erzeugten Kluftspuren auf der Verschneidungsfläche (Tracemap) berechnet. Die Ergebnisse der Funktion  $h(l)$  mit ihren zugehörigen Parametern  $\mu(h)_i$  (Mittelwert) und  $\sigma(h)_i$  (Standardabweichung) sind in Tabelle 5.10 und Abbildung 5.25 zusammengefasst. Eine Beprobungsmethode (Sampling-Method), wie beispielsweise ein „Window Mapping“, wird noch nicht angewandt. Basiert ein Ergebnis auf Berechnungen aus weniger als 10 Flächen, so wird das Ergebnis vernachlässigt. Eine umfangreiche Zusammenfassung der Ergebnisse ist auch in Tabelle 11.5 im Anhang zu finden. Die aus der Berechnung resultierenden Verteilungs- bzw. Dichtefunktionen, die für die einzelnen Kluftscharen bestimmt werden, sind hierbei nicht immer eindeutig. Die nicht korrigierten Werte der Kluftspurlängen, die in Tabelle 5.10 dargestellt sind, zeigen überwiegend eine exponentielle Verteilungsform. Allerdings folgen die Werte der NW-SE Schar an der Nordflanke und der NE-SW Schar an der Südflanke einer logarithmischen Normalverteilung. Diese erzielt die höheren Signifikanzniveaus. Vergleicht man die Ergebnisse der nicht korrigierten Kluftspurlängen  $\mu(h)_i$  der 3 Scharen direkt miteinander, erkennt man, dass diese sehr ähnliche Kluftspurlängen aufweisen. Für die WNW-ESE Schar ergibt sich mit 1,99 m der Maximalwert, wohingegen die NW-SE Schar den Minimalwert mit 1,9 m widerspiegelt. Exemplarisch sind in Abbildung 5.25 die Ergebnisse der NE-SW einfallenden Schar graphisch dargestellt. Dort sind die gemessenen Kluftspurlängen der Schar an der Westflanke der kumulativen Frequenz gegenübergestellt. Über eine Reichweite von 0,2 m bis zum Maximalwert von 5,8 m erstreckt sich das Spektrum der Kluftlängen, repräsentiert durch die blaue Kurve. Diese stellt die tatsächlich gemessenen Kluftspurlängen dar. Die aus diesen Werten ermittelte Dichtefunktion ist als orangene Kurve visualisiert und entspricht daher einem simulierten Datensatz. Die Simulation beruht auf den ermittelten Parametern (wie  $\mu(h)_i$  und  $\sigma(h)_i$ ) einer logarithmischen Normalverteilung. Diese Werte bieten die Möglichkeit die Signifikanz der identifizierten statistischen Dichtefunktion durch den



Vergleich des Verlaufs beider Kurven (der Original- und Simulationsdaten) zu überprüfen. Die tatsächlichen Kluftlängen zeigen insbesondere im Bereich von 0,6 m bis 2,2 m einen hohen Anstieg. In diesem Bereich liegen bis zu 80% der gesamten Kluftlängen. Im aufgezeigten Beispiel stimmen die Kurven gut überein. Ihr Signifikanzniveau beträgt 0,96. Laut dieser ermittelten Verteilung liegen 90% der Werte unterhalb einer Länge von 3 Metern und 50% der Werte sind kleiner als 1,8 Meter.



**Abbildung 5.25** Kumulative Dichtefunktion der Kluftspurlängen der NE-SW einfallenden Kluftchar des Steinbruchs Rockenau. Als Kluftspurlängen aufgetragen sind hier die Längen aller auf der Verschnittungsfläche (Tracemap) auftretenden Kluftspuren.

Die über das „Circular Window Mapping“ (CWM) ermittelten Ergebnisse  $f(l)$  weisen Abweichungen zu den gesamten in der Tracemap vorkommenden Kluftspurlängen  $h(l)$  auf. Die Standardabweichung ist für die Kluftspurlängen  $\hat{\mu}_l$  der 3 Scharen extrem hoch. Mit mehr als 3,2 m ist die WNW-ESE Schar fast doppelt so lang wie die NE-SW Schar (1,54 m). Die NW-SE Schar weist eine Länge von 2,1 m auf. Weiterhin zeigt sich, dass die berechneten Standardabweichungen proportional zur ermittelten Kluftspurlänge ansteigen. Alle Scharen lassen sich durch eine Exponentialverteilung bestmöglich beschreiben, allerdings zeigt sich teilweise ein recht niedriges Signifikanzniveau, insbesondere für die WNW-ESE Schar (siehe Tabelle 11.5). Die Werte liegen auf niedrigem Niveau mit teilweise unter 0,1 (Südflanke). Diese Ergebnisse sind mit Vorsicht zu nutzen und liefern keine wirkliche Beschreibung der möglichen Verteilungsfunktion. Andere Verteilungstypen weisen eine noch niedrigere Signifikanz auf, darum wird die Exponentialfunktion vorläufig als die bestmögliche angenommen.

**Tabelle 5.11** Ergebnisse des Circular Window Mapping an den Kluftspuren der “Tracemap“. Sie sind somit bereits korrigiert. Die Ergebnisse sind bereits um die aus einer zu geringen Anzahl an Ausgangsdaten (Anzahl <10) berechneten Werte bereinigt.

	NE-SW		WNW-ESE		NW-SE	
	$\hat{\mu}_l$ [m]	$\sigma_l$ [m]	$\hat{\mu}_l$ [m]	$\sigma_l$ [m]	$\hat{\mu}_l$ [m]	$\sigma_l$ [m]
Westflanke	1,4174	2,8627	3,4472	4,1234	1,9104	3,6269
Südflanke			2,6927	4,5301	2,2439	4,0872
Nordflanke	1,66403	2,35075	3,4557	4,5169		
$\mu_l$	<b>1,5407</b>	<b>2,6067</b>	<b>3,1985</b>	<b>4,3901</b>	<b>2,0772</b>	<b>3,8571</b>

In Abbildung 5.26 sind exemplarisch die Ergebnisse der an der Westflanke mit dem Circular Window Mapping bestimmten Kluftspurlängen der NE-SW einfallenden Kluftschar dargestellt. Die orangene Kurve der simulierten Kluftlängen erreicht hier einen höheren Maximalwert von bis zu 8 Metern. Hier liegen 85% aller Werte unter 3 Meter im Gegensatz zu 90% bei den nicht korrigierten Werten von  $h(l)$  (Abbildung 5.25). Direkt visualisiert wird hier das niedrigere Signifikanzniveau verglichen mit den nicht korrigierten simulierten Kluftlängen der Funktion  $h(l)$ . Es liegt bei 0,2650. Die Graphen aller weiteren untersuchten Kluftscharen sind im Anhang zu finden.

Einen schnellen Überblick über die berechneten Kluftlängen beider Methoden liefern Tabelle 5.10 und Tabelle 5.11. Der Vergleich beider Methoden zeigt, dass die berechneten Mittelwerte der Kluftspurlängen,  $\mu(h)l$  (nicht korrigiert) und  $\hat{\mu}_l$  (korrigiert), sich für alle Kluftscharen unterscheiden. Ihre Abweichung voneinander liegt maximal bei 1,2 m (WNW-ESE Schar). Am geringsten ist hier die Abweichung bei der NW-SE Schar, hier liegt die Abweichung von korrigierten zu nicht korrigierten Werten bei weniger als 0,2 m. Während die WNW-ESE und NW-SE Schar hohe korrigierte Kluftspurlängen besitzen, nimmt die Kluftspurlänge für die NE-SW Schar um 0,36 m ab. Die Standardabweichungen liegen alle signifikant (2-3 fach) höher bei der aus der Window-Mapping-Methode erlangten Ergebnisse von  $f(l)$ . Sie erreichen Werte zwischen 2,6 (NE-SW und WNW-ESE Schar) und 4,3 (WNW-ESE). Bei den nicht korrigierten Werten von  $h(l)$  liegen die Standardabweichungen bei 1,17 (NW-SE), 0,920 (NE-SW) und maximal 1,48 (WNW-ESE). Zusammenfassend weist die Kluftschar WNW-ESE die längsten Kluftspuren (1,99 – 3,2m) auf, gefolgt von der NW-SE (1,99 – 2,0 m) und der NE-SW (1,57 – 1,91 m) Kluftschar. Geht man davon aus, dass größere Trennflächen im Mittel auch größere Kluftspuren erzeugen, ist auch die planare Ausdehnung der Trennflächen des WNW-ESE am Größten. Das wird in den folgenden Abschnitten bei der Bestimmung der Trennflächenform inklusive ihrer Flächen näher expliziert.

Tabelle 11.5 enthält die detaillierten Ergebnisse der Kluftspurlängenauswertung mit Fracman aller 3 Kluftscharen an den 3 unterschiedenen Flanken des Aufschlusses Rockenau. Die auf Grundlage der ermittelten statistischen Dichtefunktion simulierten Kluftlängen zeigen kleinere Abweichung voneinander als die rein gemessenen Daten. Bis zu maximal 0,2 m liegen die Mittelwerte (NE-SW Schar) auseinander. Die simulierten Kluftlängen sind bei der WNW-ESE Schar kleiner als die gemessenen Werte, bei der NE-SW Schar größer. Für die korrigierten Kluftspurlängen der NW-SE Schar zeigt sich keinerlei Abweichung von Simulation zur Messung.

Generell passen die statistischen Verteilungen der reinen „Tracemap“ bzw. Hilfsfläche  $h(l)$ , also die Berücksichtigung aller entstehenden Kluftspuren, besser als die korrigierten Werte von  $f(l)$  aus dem Circular Window Mapping. Dies lässt sich über ihre Signifikanzniveaus ermitteln. Letztgenannte weisen durchgehend ein niedrigeres Signifikanzniveau und höhere KS-Test Werte auf (Tabelle 11.6). Die Signifikanzniveaus der nicht korrigierten Werte liegen im Mittel stets über 0,81 und erreichen für das NE-SW Set sogar durchschnittliche Werte von 0,98. Die Signifikanzniveaus der korrigierten Werte schwanken dagegen zwischen 0,22 und maximal 0,86.

Auffallend ist hierbei aber die große Streuung dieser Signifikanzniveaus einzelner Scharen, sowohl bei den CWM als auch bei den nicht korrigierten Werten. So schwanken die Werte des NE-SW Sets (bei den korrigierten Werten) von 0,42 an der Westflanke zu 0,99 an der Nordflanke.

Zusammenfassend lässt sich konstatieren, dass die ermittelten Verteilungsfunktionen der korrigierten Funktion  $f(l)$  eine geringere Signifikanz aufweisen, als die nicht korrigierten Werte von der Verteilungen  $h(l)$ . Oft ergibt sich, dass die Werte von  $f(l)$  größer als die von  $h(l)$  ausfallen bei einem gleichzeitigen sehr hohen Anstieg der zugehörigen Standardabweichung. Alle Werte lassen sich bestmöglich über eine Exponentialfunktion beschreiben.



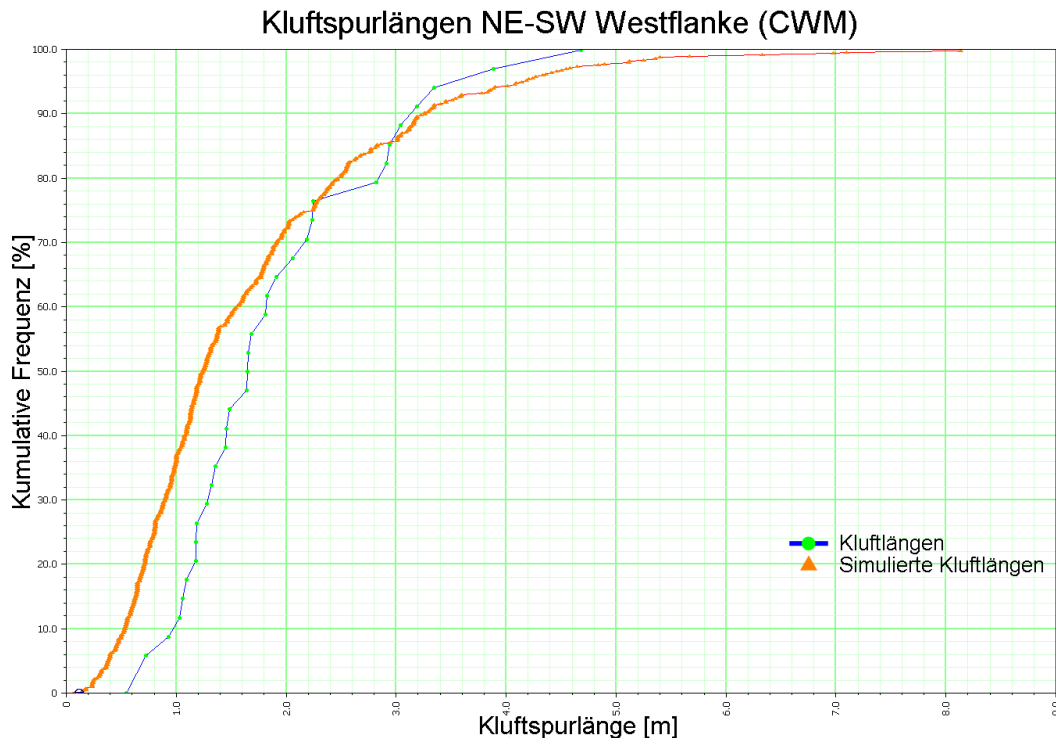


Abbildung 5.26 Kumulative Dichtefunktion der Kluftspurlängen der NE-SW (CMW) einfallenden Kluftchar des Steinbruchs Rockenau. Als Kluftspurlängen aufgetragen sind hier die Längen aller auf der Verschnittungsfläche (Tracemap) auftretenden Kluftspuren (blaue Kurve) und die Kurve der simulierten Kluftlängen, die auf Grundlage der Dichtefunktion erstellt wurden, die durch das Circular Window Mapping bestimmt sind.

### 5.2.7 Berechnung der Trennflächengröße aus Kluftspurlängen

Aus den in Kapitel 5.2.5 berechneten durchschnittlichen Kluftspurlängen können die zugrunde liegenden Kluftgrößen bestimmt werden. Dies kann unter der Annahme, dass die Trennflächen kreisförmig (Kapitel 2.5.6), elliptisch (Kapitel 2.5.7) oder rechteckig (Kapitel 2.5.9) sind, erfolgen.

#### **Kreisförmig Klüfte**

Die einfachste anzunehmende Form ist ein Kreis. Die Umrechnung der Kluftspurlängen in Kreisradien erfolgt zum einen direkt in Fracman zum anderen durch die Anwendung der Formeln aus Tabelle 2.1 aus den durchschnittlichen Kluftspurlängen mit zugehöriger Standardabweichung erfolgen. Die Ergebnisse sind der Tabelle 5.12 (oder im Anhang Tabelle 11.6) zu entnehmen. Es wurden sowohl Radien für die korrigierten ( $\hat{\mu}_l$ , gekennzeichnet durch das Kürzel „CWM“ für Circular Window Mapping) als auch für die nicht korrigierten Kluftspurlängen ( $\mu(h)_l$ ) berechnet.

Die Radien der nicht korrigierten Ergebnisse variieren leicht zwischen 0,61 (NW-SE) und 0,64 (WNW-ESE) Meter. Die Spannweite der berechneten Radien aus den korrigierten Längen ist erheblich größer und reicht von 0,48 m (NE-SW), über 0,60 m (NW-SE) bis zu 1,01 m (WNW-ESE). Die relativen Differenzen betragen zwischen den beiden methodischen Ansätzen 0,13 (NE-SW), 0,37 m (WNW-ESE) und 0,06 m (NW-SE). Für die NE-SW Schar ist der Radius der korrigierten Werte kleiner, während er für WNW-ESE und NW-SE größer ausfällt.

Tabelle 5.12 Berechnung der mittleren Radien aus den durchschnittlichen Kluftspurlängen (nach Zhang und Einstein 1998).

Kluftschar	Durschn. Kluftlänge [m]	Mittlerer Radius [m]
NE-SW Westflanke CWM	1,4174	0,4465
NE-SW Nordflanke CWM	1,6640	0,5210
NE-SW Südflanke CWM	-	
Mittelwert	1,5407	0,4837
NE-SW Westflanke	1,9157	0,6098
NE-SW Nordflanke	1,9162	0,6099
NE-SW Südflanke	-	
Mittelwert	1,9160	0,6099

WNW-ESE Westflanke CWM	3,4472	1,0973
WNW-ESE Nordflanke CWM	2,6927	0,8571
WNW-ESE Südflanke CWM	3,4557	1,1000
Mittelwert	3,1985	1,0181
WNW-ESE Westflanke	2,6529	0,8444
WNW-ESE Nordflanke	1,9299	0,6143
WNW-ESE Südflanke	1,4114	0,4493
Mittelwert	1,9981	0,6360

NW-SE Westflanke CWM	1,2401	0,6081
NW-SE Nordflanke CWM	-	
NW-SE Südflanke CWM	2,4586	0,7142
Mittelwert	1,8494	0,6612
NW-SE Westflanke	1,7982	0,5732
NW-SE Nordflanke	-	
NW-SE Südflanke	2,0192	0,6427
Mittelwert	1,9087	0,6080

### Elliptische Klüfte

Werden die Trennflächen als Ellipsen angenähert, wird der Ansatz nach (Zhang et al. 2002) genutzt. Dieser wird ausführlich in Kapitel 2.5.7 vorgestellt. Für 3 verschiedene Verteilungstypen gibt Tabelle 2.2 Formeln vor, um den Durchmesser  $\mu_a$  der Ellipse zu quantifizieren. Die Werte für  $\mu_l$  und  $\sigma_l$ , aus denen  $\mu_a$  und  $\sigma_a$  der Ellipsen berechnet werden, sind der Tabelle 11.6 zu entnehmen. Um den nötigen Faktor  $M$  zu berechnen, sind Angaben zum Winkel  $\beta_e$  (Winkel zwischen Kluftspur- und Achsenorientierung der Ellipse) und des Achsenverhältnisses  $k_e$  (aspect ratio) nötig. Für das Achsenverhältnis  $k_e$  werden 5 Standardwerte angenommen (1, 2, 4, 6, 8) (siehe Zhang 2005, Zhang et al. 2002). Da die Hauptachsenorientierung (von nun an als  $\gamma$  gekennzeichnet) unbekannt ist, werden unterschiedliche Werte für diese angenommen und auf dieser Grundlage der Winkel  $\beta$  für jede einzelne Kluftschar berechnet. Für die jeweiligen  $k_e$ -Werte und die vorläufig berechneten  $\beta_e$  Winkel werden nun  $\mu_a$  und  $\sigma_a$  nach Tabelle 2.2 berechnet. Durch die Darstellung der  $\mu_a$ - und  $\sigma_a$ -Werte gegen  $k$  wird über Variation des Winkels  $\beta_e$  ein gemeinsamer Schnittpunkt der  $\mu_a$ - und  $\sigma_a$ -Linien erreicht. Die Schnittpunkte müssen auf einer zur y-Achse parallelen Verbindungslinie liegen. Der Schnittpunkt mit der x-Achse spiegelt den zugehörigen  $k_e$ -Wert wider. Die dort auf der y-Achse abgelesenen Werte sind die zugehörigen finalen Ergebnisse der Auswertung für  $\mu_a$  und  $\sigma_a$ . Die Auswertung erfolgt für jeweils alle 3 identifizierten Kluftscharen und jeweils für die West-, Nord- und Südflanke. Nur die Werte aus dem „Circular Window Mapping“ (CWM) werden herangezogen, da die Methode nach (Zhang et al. 2002) auf diesem Ansatz beruht. Für drei verschiedene Verteilungstypen liegen Formeln zur Berechnung der  $\mu_a$ - und  $\sigma_a$ -Werte vor (Gamma-Verteilung, Logarithmische-Normalverteilung und Logarithmische Normalverteilung). Die mit Fracman durchgeführte Analyse ermittelt für die

Kluftspurlängen größtenteils exponentielle Dichtefunktionen. Auf dieser Basis werden zunächst bei der Umrechnung (nach Tabelle 2.2) die Formeln der Exponentialverteilung gewählt. Die Ergebnisse sind zufriedenstellend (siehe Abbildung 5.27, Abbildung 5.28, Abbildung 5.29) und Tests auf eine Gamma- und logarithmische Normalverteilung nicht erfolgreich. Für alle 3 Kluftscharen sind die  $\mu_a$ - und  $\sigma_a$ -Werte, die Achsenverhältnisse  $k_e$  und die zugehörigen Winkel der Hauptachsenorientierung  $\gamma_e$  (Tabelle 5.13) bestimmt. So können die ellipsenförmigen Trennflächen genau in Orientierung und Größe beschrieben werden. Bei der Berechnung des Winkel  $\beta_e$  besteht die Schwierigkeit, dass unklar ist, in welche Richtung die Hauptachse ( $\gamma_e$ ) der Ellipse die Kluftspur an der zu untersuchenden Stelle schneidet. Eine Abschätzung von  $\gamma_e$  ist meist schwierig und erfordert einen längeren Arbeitsaufwand. Die Kluftchar NE-SW hat eine durchschnittliche Ellipsenhauptachsenlänge  $\mu_a$  von 2,4 m. Das Achsenverhältnis  $k_e$  beträgt ungefähr 4. Die Orientierungen der Hauptachse  $\gamma_e$  der Ellipsen beträgt  $75^\circ$  (Tabelle 5.13). Eine ähnliche Größe ist für WNW-ESE berechnet. Hier liegt die Länge der Ellipsenhauptachse bei 2,5 m bei einem etwas flacheren Einfallswinkel von  $65^\circ$  und höherem Achsenverhältnis  $k_e$  von 4,2. Die NW-SE Schar ist die längste mit 2,9 m und dem niedrigsten Achsenverhältnis von 2,3, daher ist die Ellipsenfläche auch die mit Abstand größte der 3 Kluftscharen. Sie fällt mit  $85^\circ$  fast senkrecht ein.

Insgesamt zeigt sich, dass alle 3 Scharen sehr steile bis senkrecht stehende Ellipsen darstellen, mit einem Achsenverhältnis zwischen 2 und 4. Anders, als bei den reinen Kluftspurlängen, spiegeln sich hier andere Größenverhältnisse der Scharen untereinander wider. Nach der Evaluation der Kluftflächen als Ellipsen, ist die NW-SE Schar die größte.

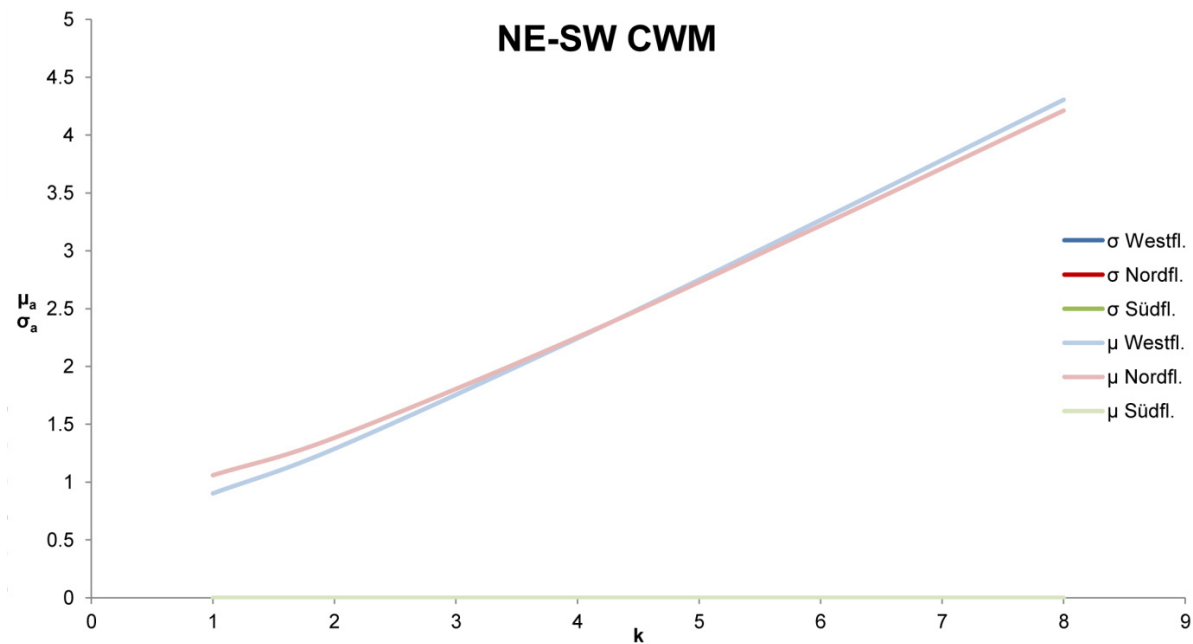


Abbildung 5.27 Diagramm der in Abhängigkeit des Winkels  $\beta_e$  und des Achsenverhältnisses  $k_e$  ermittelten Werte für  $\mu_a$  und  $\sigma_a$  der Kluftchar NE-SW im Aufschluss Rockenau. Für jede beprobte Aufschlusswand im Steinbruch (West- (blau), Nord- (rot) und Südflanke (grün)) werden die Resultate ermittelt. Die nicht berücksichtigten Resultate aus zu wenig erfassten Kluftflächen (Anzahl  $<10$ ) wurden bereits herausgefiltert. Der Wert des Winkels  $\beta$  wurde solange angepasst bis sich die 2 Linien der mittleren Kluftspurlängen  $\mu_a$  und der Standardabweichung der Kluftspurlängen  $\sigma_a$  in jeweils einem Punkt schneiden, so dass sie das gleiche Achsenverhältnis  $k$  aufweisen. Bei einem Achsenverhältnis  $k_e$  von 4 ergibt sich  $\mu_a$  zu 2,4 m und  $\sigma_a$  zu 2,4 m.

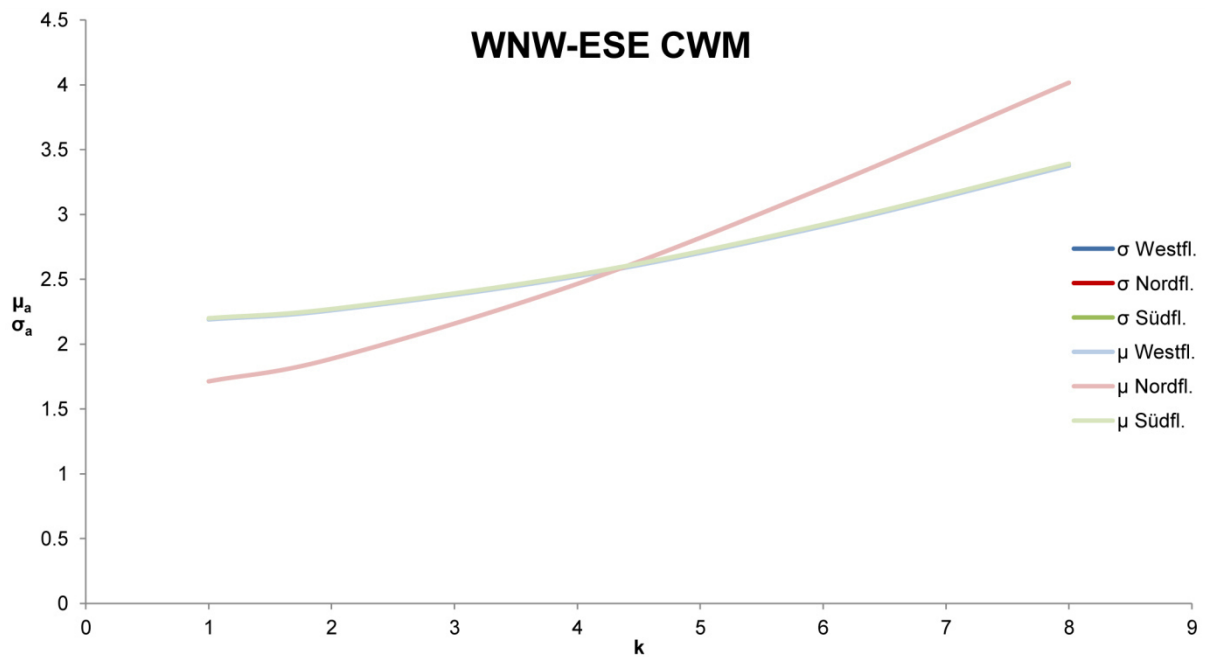


Abbildung 5.28 Diagramm der in Abhängigkeit des Winkels  $\beta_e$  und des Achsenverhältnisses  $k_e$  ermittelten Werte für  $\mu_a$  und  $\sigma_a$  der Kluftchar WNW-ESE im Aufschluss Rockenau. Für jede beprobte Aufschlusswand im Steinbruch (West- (blau), Nord- (rot) und Südflanke (grün)) werden die Resultate ermittelt. Der Wert des Winkels  $\beta_e$  wurde solange angepasst bis sich die 3 Linien der mittleren Kluftspurlängen  $\mu_a$  und der Standardabweichung der Kluftspurlängen  $\sigma_a$  in jeweils einem Punkt schneiden, so dass sie das gleiche Achsenverhältnis  $k$  aufweisen. Bei einem Achsenverhältnis  $k_e$  von 4,2 ergibt sich  $\mu_a$  zu 2,5 m und  $\sigma_a$  zu 2,5 m.

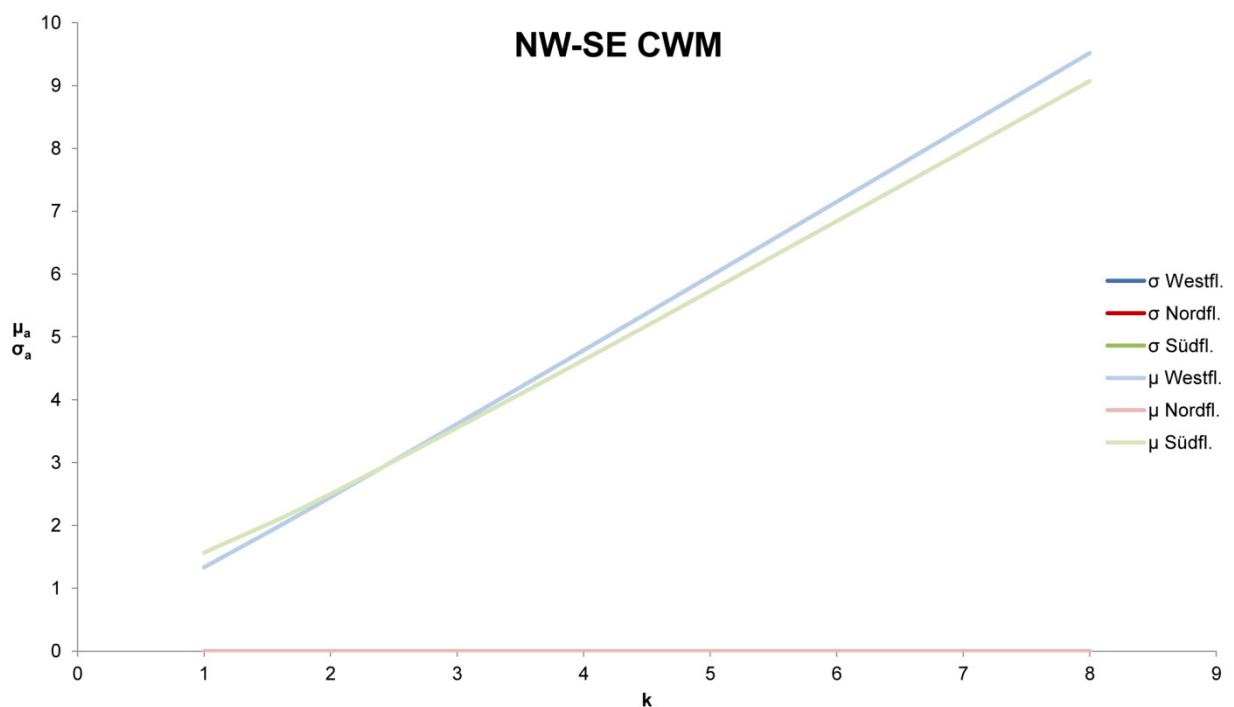


Abbildung 5.29 Diagramm der in Abhängigkeit des Winkels  $\beta_e$  und des Achsenverhältnisses  $k_e$  ermittelten Werte für  $\mu_a$  und  $\sigma_a$  der Kluftchar NW-SE im Aufschluss Rockenau. Für jede beprobte Aufschlusswand im Steinbruch (West- (blau), Nord- (rot) und Südflanke (grün)) werden die Resultate ermittelt. Die nicht berücksichtigten Resultate aus zu wenig erfassten Kluftflächen (Anzahl  $< 10$ ) wurden bereits herausgefiltert. Der Wert des Winkels  $\beta_e$  wurde solange angepasst bis sich die 3 Linien der mittleren Kluftspurlängen  $\mu_a$  und der Standardabweichung der Kluftspurlängen  $\sigma_a$  in jeweils einem Punkt schneiden, so dass sie das gleiche Achsenverhältnis  $k$  aufweisen. Bei einem Achsenverhältnis  $k_e$  von 2,3 ergibt sich  $\mu_a$  zu 2,9 m und  $\sigma_a$  zu 2,9 m.

Tabelle 5.13 Zusammenfassung der Ergebnisse der Kluftgrößenbestimmung für die 3 Kluftscharen des Steinbruchs Rockenau. Der mittlere Kluftdurchmesser  $\mu_a$  (entspricht der Hauptachse der Ellipse) und dessen Standardabweichung  $\sigma_a$ , das Achsenverhältnis der Ellipse  $k$ , die beiden möglichen Orientierungen (bzw. Einfallwinkel) der Ellipsenhauptachse  $\gamma_e^-$  und  $\gamma_e^+$  sowie der zuvor bestimmte Kreisradius als Vergleichsgröße sind in der Tabelle aufgeführt.

Kluftchar	$\mu_a$ [m]	$\sigma_a$ [m]	k	$\gamma_e$ [°]	Radius [m]
NE-SW CWM	2,4	2,4	4	75	0,4837
WNW-ESE CWM	2,5	2,5	4,2	65	0,5151
NW-SE CWM	2,9	2,9	2,3	85	0,6612

Die Ergebnisse werden noch auf ihre Eignung hin überprüft. Eine Exponentialverteilung passt am besten zu den ermittelten Werten. Der Eignungstest (2.5.8, Formel 2.18) der gewählten Verteilungsfunktion der zugehörigen Kluftgrößen zeigt, dass sie vor allem für das NE-SW und WNW-ESE besonders robust erscheint (Tabelle 5.14). Die Kluftchar NW-SE weist eine weniger gute Übereinstimmung der linken und rechten Seite der Gleichung 2.18 für die Exponentialfunktion auf, robuster ist hier die Gammafunktion. Allerdings ist die Umrechnung der Kluftspurlängen in die Hauptachsenlängen der Ellipse über die Gammafunktion nicht definiert, wenn die Standardabweichung größer als der Mittelwert ist. Daher wird die Gammafunktion verworfen. Die Formeln bestätigen die graphische Auswertung bei der Bestimmung der Parameter. Dort zeigt sich bereits, dass nur die Exponentialverteilung für den Datensatz ist geeignet.

Tabelle 5.14 Überprüfung der Ergebnisse auf ihre statistische Robustheit. Tests für 3 verschiedene Dichtefunktionen (logarithmisch-normalverteilt, negativ-exponentiell verteilt und gammaverteilt) werden für jede Kluftchar durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die negativ-exponentielle Verteilung die geringste Abweichung von linker und rechter Seite der genutzten Gleichungen (s. Kapitel 2.5.8) zeigt und somit als gewählte Dichtefunktion bestätigt wird.

Test	NE-SW		WNW-ESE		NW-SE	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Log-Normal	175,62	32,61	1000,00	164,36	884,74	429,19
Negativ-Exponentiell	<b>47,04</b>	<b>32,61</b>	150,00	164,36	<b>138,24</b>	<b>429,19</b>
Gamma	65,86	32,61	375,00	164,36	331,78	429,19

### Rechteckige Klüfte

Wie in Kapitel 2.5.9 dargestellt, können die Resultate der Trennflächengröße für den Fall von Ellipsen auch auf Rechtecke angewandt werden. Die Hauptachse  $a$  der Ellipse wird zur Berechnung der Breite des Rechtecks genutzt und über das Achsenverhältnis  $k$  kann die Nebenachse  $b$  der Ellipse berechnet werden, um schlussendlich die Höhe  $H$  des Rechtecks zu quantifizieren. Die durchschnittliche Länge der Hauptachse der Ellipse  $a$  ist gleich  $\mu_a$ . Die Breite lässt sich über  $B = 0,87 \cdot a$  und die Höhe über  $H = 0,87 \cdot b$  bestimmt. Über Multiplikation der Höhe  $H$  und Breite  $B$  wird die Fläche des Rechtecks berechnet.

Für die NE-SW Schar ergeben sich durchschnittlich die kleinsten Rechtecke mit Kantenlängen von 0,52 m und 2,09 m (Tabelle 5.15). Der Flächeninhalt beträgt 1,09 m<sup>2</sup>. Die WNW-ESE Schar weist eine etwas kleinere Höhe aber größere Breite auf, was in einem höheren Flächeninhalt von 1,12 m<sup>2</sup> resultiert. Der größte Flächeninhalt, 2,6 m<sup>2</sup>, und die höchsten Kantenlängen, 2,5 m und 1,1 m, werden für die Kluftflächen der WNW-ESE Schar berechnet.

**Tabelle 5.15** Berechnung der Breite B, Höhe H und Fläche der Rechtecke aus den identifizierten Ellipsengrößen a, b und k. Breite und Höhe entspricht jeweils dem 0,87-fachen der jeweiligen Ellipsenachse. Als Vergleichswerte sind die Flächen der Ellipsen  $A_E$  und Flächen der Rechtecke  $A_R$  zusätzlich angegeben.

	Breite [m]	Höhe [m]	$A_R$ [m <sup>2</sup> ]	$\mu_a$ [m]=a	k	b [m]	$A_E$ [m <sup>2</sup> ]
NE-SW	2,0880	0,5220	1,0899	2,4000	4	0,6000	1,1310
WNW-ESE	2,1750	0,5179	1,1263	2,5	4,2	0,5952	1,1687
NW-SE	2,5230	1,0556	2,6634	2,9000	2,39	1,2134	2,7637

## 5.2.8 Zusammenfassung der erreichten Ergebnisse

Insgesamt wurden durch die Punktwolke des Steinbruchs Rockenau drei markante Kluftscharen über ihre Raumlage identifiziert. Anhand der in der Punktwolke sichtbaren, aufgeschlossenen Kluftflächen werden Methoden zur Quantifizierung der Kluftgröße erprobt. Zunächst werden die aufgeschlossenen Flächen selbst quantifiziert und Parameter wie die aufgeschlossene Flächengröße und maximale Ausdehnung berechnet. Zur Identifizierung der Flächen in der Punktwolke wird die Software SplitFX genutzt. Anschließend werden aus den Flächen erstellte „künstliche“ Kluftspuren erzeugt und ebenfalls quantifiziert. Die Quantifizierung erfolgt hier mithilfe der Softwarepakete CloudCompare und Fracman. Abschließend werden mögliche, den aufgeschlossenen Klüften zugrundeliegende, Kluftformen und Kluftgrößen ermittelt. Die Resultate sind in der Tabelle 5.16 aufgeführt.

**Tabelle 5.16** Vergleich der über die erste Methode erlangten durchschnittlichen Kluftgrößen und Parameter aus den aufgeschlossenen Kluftflächen (aus SplitFX) mit den künstlich erzeugten Kluftspurlängen  $\mu(h)_i$  und  $\mu_i$  aus den ermittelten Kluftgrößen (über Fracman).

### Methode 1: Auswertung mit SplitFX

Kluftchar	$h_{max}$ [m]	$l_{max}$ [m]	Kreisradius [m]	A Kreis [m <sup>2</sup> ]	A Quadrat [m <sup>2</sup> ]	A Rechteck 2:1 [m <sup>2</sup> ]	A Rechteck 3:2 [m <sup>2</sup> ]	A Rechteck 4:1 [m <sup>2</sup> ]	A SplitFX [m <sup>2</sup> ]
NE-SW	1,15	1,97	0,98	3,03	1,93	1,55	1,78	0,91	0,68
WNW-ESE	2,08	2,62	1,31	5,37	3,42	2,74	3,16	1,61	1,51
NW-SE	1,41	2,24	1,12	3,94	2,51	2,01	2,32	1,18	1,28

### Methode 2: Auswertung mit Fracman

Kluftchar	$\mu(h)_i$ [m]	$\mu_i$ [m]	Kreisradius [m]	A Kreis [m <sup>2</sup> ]	Ellipse a = $\mu_a$ [m]	Ellipse b [m]	$A_E$ [m <sup>2</sup> ]	$A_R$ [m <sup>2</sup> ]	k
NE-SW	1,92	1,54	0,48	0,74	2,40	0,60	1,13	1,09	4
WNW-ESE	2,00	3,20	1,02	3,26	2,50	0,60	1,17	1,13	4,2
NW-SE	1,91	2,08	0,66	1,37	2,90	1,21	2,76	2,66	2,4

Die Auswertung der Kluftflächen auf Grundlage der erkannten maximalen Ausdehnung in der Punktwolke zeigt, dass die WNW-ESE Schar die größte der 3 untersuchten darstellt. Sowohl ihre maximale Ausdehnung  $l_{max}$  als auch die Höhe  $h_{max}$  offenbaren hier Maximalwerte. Da die Bestimmung der Flächengrößen unterschiedlicher geometrischer Formen, wie eines Kreises, Quadrats und Rechtecks, auf Grundlage dieser Parameter erfolgt, verbleibt in der Relation das Größenverhältnis der Kluftscharen zueinander konstant. Einzig die direkt aus SplitFX ermittelten Flächengrößen ( $A_{SplitFX}$  in Tabelle 5.16) basieren nicht auf dem Parameter  $l_{max}$ . Die über  $l_{max}$  berechneten Flächen sind alle größer als die in SplitFX angenäherten Flächen. Dies liegt vor allem darin begründet, dass die in SplitFX ermittelten Flächen den reinen Inhalt der Polygone angeben. Diese Polygone sind sehr unregelmäßig. An ihren Rändern sind oft Einkerbungen zu finden. Angenommen die zu identifizierende Fläche habe die Form eines Rechtecks, so spiegelt das Polygon aus der Identifizierung nicht hundertprozentig dieses Rechteck mit geraden Kanten wider, sondern das Polygon ist an vielen

Seiten eingeschnitten und deckt das Rechteck dadurch nur unvollständig ab (Abbildung 5.30). Bei der Berechnung von  $l_{max}$  wird die maximale Ausdehnung des Polygons unter der Annahme genutzt, dass  $l_{max}$  die Diagonale eines Rechtecks sei, daher wird die Fläche dieses auf  $l_{max}$  beruhenden Rechtecks stets eine größere Fläche als das Polygon selbst aufweisen.

Die Auswertung auf Grundlage der Kluftspurlängen (mit Fracman) zeigt für die Kluftscharen untereinander den gleichen Trend. Auch hier ist die WNW-ESE Schar die mit den höchsten Werten ( $\mu_l = 3,2$  m), gefolgt von der NW-SE (2,08 m) und NE-SW (1,54 m) Schar.

Die Ergebnisse lassen sich in Längenergebnisse (Länge/Ausdehnung von Kluftflächen oder Kluftspuren) sowie Flächenergebnisse (Größe der Kluftflächen bei Annahme unterschiedlicher geometrischer Formen) unterscheiden.

Bei den ermittelten Längen zeigt sich ein diffuses Bild beim Vergleich beider methodischen Ansätze. Sowohl für die NE-SW als auch die NW-SE Schar sind die ermittelten maximalen Ausdehnungsparameter  $l_{max}$  größer als die gemessene Kluftspur  $\mu_l$ . Ein gegenläufiger Trend wird durch die WNW-ESE Schar markiert. Es lässt sich kein direkter Zusammenhang zwischen beiden Parametern festmachen. Lediglich die Reihenfolge der Werte ist bei beiden Methoden gleich (1. WNW-ESE, 2. NW-SE, 3. NE-SW). Beide Methoden erlauben ein Abschätzen des Radius' eines, die Kluftfläche repräsentierenden, Kreises. Die Radien der Methode über Fracman sind konstant kleiner um 0,3 (WNW-ESE) m bis 0,5 m (NE-SW) und somit auch die zugehörigen Kreisflächen. Die Abschätzung der Radien beruht auf  $\mu_l$ , beziehungsweise  $l_{max}$ . Obwohl bei der WNW-ESE Schar  $\mu_l$  größer als  $l_{max}$  ist, ist der Kreisradius geringer.

Der Vergleich der Flächenresultate beider Auswertemethoden offenbart, dass die Flächen der ersten Methode im Allgemeinen größer ausfallen als die der zweiten Methode. Einen direkten Vergleich ermöglichen die Kreisflächen, diese sind bis zu 2,6 m<sup>2</sup> größer bei Methode 1. Weiterhin können die Rechteckflächen beider Methoden in Relation gesetzt werden. Die NW-SW und WNW-ESE Schar haben beide ein Achsenverhältnis  $k$  von ungefähr 4:1. Die ermittelte Rechteckfläche  $A_R$  kann nun direkt mit der Fläche der Rechtecke aus Methode 1 verglichen werden, für die eben jenes 4:1 als Annäherung gewählt wurde. Die Ergebnisse stimmen nicht überein. Generell würde man vermuten, dass die Flächen  $A_R$  insgesamt größer ausfallen, da sie die wahre Kluftflächengröße abschätzen sollen und nicht nur auf sichtbaren Flächengrößen im Aufschluss basieren (wie bei Methode 1). Diese Tendenz ist bei der Schar WNW-ESE nicht zu erkennen. Die Fläche ist hier um 0,5 m<sup>2</sup> kleiner abgeschätzt. Die Rechtecke der NW-SE lassen sich gut mit den Flächen der Rechtecke aus dem 2:1 Verhältnis vergleichen. Wie eigentlich zu erwarten, ist hier die Fläche  $A_R$  der Methode 2 größer als die aus Methode 1.

Über Methode 2 werden nach (Zhang et al. 2002) auch direkt Ellipsengrößen  $A_E$  angenähert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Ellipsen der Scharen NE-SW und WNW-ESE gleich groß ausfallen. Ihre Flächengröße liegt zwischen 1,13 m<sup>2</sup> und 1,17 m<sup>2</sup>. Die NW-SE Schar besitzt die größten Ellipsen mit bis zu 2,76 m<sup>2</sup> und ist damit 2mal größer als die Scharen WNW-ESE und NE-SW. Der Unterschied in der Flächengröße ist vorrangig geprägt durch das niedrigere Achsenverhältnis der NW-SE Schar von 2, im Gegensatz zu einem Achsenverhältnis von 4 der beiden anderen Scharen. Die Hauptachsenlänge beträgt für die größte Ellipse 2,9 m und für die kleinste (NE-SW) noch 2,4 m.

Als weitere Vergleichsgröße sind die durchschnittlichen Flächengrößen, die direkt in SplitFX bestimmt werden, aufgeführt. Vergleicht man diese mit den berechneten Ellipsen oder auch Rechteckgrößen aus Methode 2, so fällt auf, dass die letztgenannten im Schnitt kleiner ausfallen. Theoretisch sollten die errechneten Kluftgrößen größer sein als die sichtbare Fläche im Aufschluss.

### 5.2.9 Diskussion

In dem Steinbruch bei Rockenau finden sich ausschließlich Sedimentgesteine. Die untersuchten Kluftscharen gehören den mächtigen Sandsteinschichten an. Sind Klüfte natürlich begrenzt durch andere geologische Strukturen, wird auch ihre Form beeinflusst. Die untersuchten Kluftscharen terminieren stets an der im Steinbruch vorhandenen Schichtung. Dadurch ist anzunehmen, dass diese auch eine rechteckige Form aufweisen (Zhang und Einstein 2010). Allgemein gilt, dass Aufschlüsse bei der Untersuchung durch einen Laserscanner ein hohes Relief aufweisen müssen, da nur Flächen aber keine Kluftspuren detektiert werden können. Ist das Relief nur schwach ausgeprägt, können nur wenige Klüfte erfasst werden. Die Genauigkeit der Ergebnisse nimmt daher proportional mit dem



Relief ab. Ein Parameter, um das Relief eines Aufschlusses zu bestimmen, ist das „Outcrop Area Ratio“ (OAR) (Enge et al. 2007).

### **Identifizierung von Flächen in Punktwolken**

Zwei Methoden der Identifizierung von Flächen in Punktwolken werden in dieser Dissertation vorgestellt. Neben bereits erwähnten Nachteilen der Methode 1 über die Software SplitFX existieren noch weitere Schwierigkeiten. Für den in SplitFX genutzten Algorithmus ist zwingend eine Triangulation der Punktwolke nötig. Hierbei handelt es sich allerdings nur um eine 2.5D Triangulation und keine wahre 3D Triangulation. Dies hat zur Folge, dass die gesamte Punktwolke in einzelne, möglichst planare, Teilbereiche gegliedert werden muss (Abbildung 5.30 zeigt einen solchen Teilbereich). Sowohl die Triangulation als auch die spätere Flächenauswertung muss für jeden Teilbereich einzeln durchgeführt werden. Zudem arbeitet der Algorithmus teilweise sehr ungenau und muss manuell nachjustiert werden. Oft werden nicht miteinander verknüpfte Bereiche gleicher Orientierung durch den Algorithmus zusammengefasst oder die Triangulation ist zu grob, sodass Flächeninformationen verloren gehen oder einzelne Bereiche zu großzügig zusammengefasst werden, die eigentlich unterschiedliche Orientierungen aufweisen. Der RANSAC-Algorithmus der Methode 2 hat den klaren Vorteil, dass keine Triangulation notwendig ist. Aber auch dieser Algorithmus reagiert sehr sensitiv auf die gewählten Parameter und Ergebnisse müssen durch den Bearbeiter geprüft werden. Insgesamt bedürfen beide Methoden einer hohen Erfahrung seitens des Bearbeiters. Im Bereich kleinerer Flächen mit einer geringen Auflösung tendieren beide Methoden dazu diese Flächen nicht zu identifizieren. Daher sollte schon im Gelände eine möglichst große Auflösung bei kleinräumigen Kluftstrukturen gewählt werden, um die Anzahl identifizierter Flächen zu maximieren.

### **Verzerrung der Ergebnisse in Punktwolken**

In Kapitel 2.5.10 wird die Verzerrung der Ergebnisse durch verschiedene Einflussfaktoren beleuchtet. Durch die Anwendung eines Laserscanners spielt vor allem der Faktor d), das sogenannte „Truncation“ eine Rolle. Die vorhandene Auflösung der Punktwolke beeinflusst hier maßgeblich den unteren Schwellenwert. Genauere Ergebnisse werden durch eine Erhöhung der Punktwolkenauflösung erreicht. Hingegen wird Punkt e), die Zensur oder „Censorship“, reduziert, da durch den Laserscanner Möglichkeiten vorhanden sind, auch große Strukturen ausreichend zu vermessen.

### **Die Parameter $l_{max}$ und $h_{max}$**

Alle angenommenen geometrischen Formen der Methode 1 werden auf Basis des Parameters  $l_{max}$  berechnet. Nach der in dieser Dissertation vorgestellten Methode bestimmt dieser in der Punktwolke gemessene Wert allein die angenommene Größe der Kluftflächen. Größenverhältnisse von Klüften untereinander (beim Vergleich verschiedener Scharen) können direkt über den Parameter  $l_{max}$  erfolgen. Die Ergebnisse bleiben eine Annäherung an die wahre Kluftgröße und werden diese stets unterschätzen. Die bestimmten Verteilungen müssen Richtung höherer Werte verschoben werden, so dass sie die wahren Kluftlängen angeben. Es ist unbekannt, um welchen Wert diese Anpassung zu erfolgen hat. Zu bedenken gilt es, dass die hier vorgestellten Parameter  $l_{max}$  und  $h_{max}$  keine Messungen der Kluftspurlängen sind, sondern eine Aussage über die maximale Ausdehnung und die Höhe der aufgeschlossenen und somit sichtbaren Kluftflächen im Aufschluss ermöglichen. Der Parameter  $l_{max}$  liegt rein theoretisch zwischen der Verteilung sichtbarer Kluftspuren im Aufschluss und der wahren maximalen Ausdehnung (oder Hauptachsenlänge) der Kluft. Die Wahrscheinlichkeit ist hoch, dass der Verschnitt einer Kluftfläche mit der Böschungsebene oder einer anderen planaren Fläche an der Aufschlusswand eine Kluftspur erzeugt, die kürzer ist als die Diagonale einer aufgeschlossenen Fläche der gleichen Schar.

### **Die Parameter $\mu(h)_i$ und $\mu_l$**

Unterschieden wird bei der Quantifizierung von Kluftspurlängen mit Fracman zwischen  $\mu(h)_i$  und  $\mu_l$ . Während  $\mu(h)_i$  alle Kluftspurlängen einer Schar repräsentiert, folgt  $\mu_l$  aus einer Beprobung und ist somit Teilmenge von  $\mu(h)_i$ . Aber nur das Ergebnis berücksichtigt auch Verzerrungen bei der Beprobung, wie sie in Kapitel 2.5.10 aufgeführt sind (vergleiche auch Zhang und Einstein 2000, Zhang 2005). Die in Tabelle 5.16 aufgeführten Ergebnisse zeigen, dass der Wert  $\mu(h)_i$  für die 3 Kluftscharen ungefähr gleich groß ist, erst die Korrektur und das so erlangte Resultat  $\mu_l$  geben ein

klares Bild der Kluftspurlängen. Dieser Parameter ist bei der Auswertung also stets primär auszuwählen und  $\mu(h)_l$  vorzuziehen.

### ***Der Aufschluss Rockenau***

Der in diesem Kapitel gewählte Aufschluss zeichnet sich durch eine lokal nahezu horizontale Schichtung aus. Die 3 gewählten Kluftscharen innerhalb dieses Aufschlusses terminieren gegen die Schichtung. Da sowohl die gewählten Kluftscharen als auch die Aufschlusswand nahezu saiger stehen, entspricht die Höhe der Kluft (quantifiziert über den Parameter  $h_{max}$ ), falls komplett aufgeschlossen, auch der Länge möglicher sichtbarer Kluftspuren. Der Parameter  $h_{max}$  ist aber in 2 Fällen (NE-SW und NW-SE) größer als die mittleren Kluftspurlängen  $\mu(h)_l$  und korrigierten Kluftspurlängen  $\mu_l$ . Das liegt vor allem daran, dass die gewählten Verschneidungsflächen (Tracemap, siehe Abbildung 5.24 E+F) nicht horizontal ausgerichtet sondern zur Aufschlusswand hin geneigt sind. Der Schritt ist notwendig, um die Anzahl der erzeugten Verschneidungen zu maximieren. Durch die Neigung bzw. unterschiedliche Ausrichtung von Aufschlusswand und Verschneidungsfläche sind die erzeugten Kluftspuren in Relation länger. Bei der Annäherung der zugrunde liegenden Flächengröße der Klüfte durch Ellipsen nach Zhang et al. (2002) wird dieser Neigung Rechnung getragen und die Ergebnisse dementsprechend korrigiert.

### ***Probleme bei der Quantifizierung der Kluftgröße***

Die WNW-ESE Kluftchar weist bei der Berechnung der Ellipsenfläche  $A_E$  und der Rechteckfläche  $A_R$  Werte auf, die unter den aus SplitFX auf Grundlage der Polygone berechneten Flächen liegen. Dieses Ergebnis sagt aus, dass die ermittelte Originalgröße der Kluft, der ja auch die aufgeschlossenen Kluftflächen im Aufschluss zugrunde liegen, kleiner ist, als eben diese sichtbaren/aufgeschlossenen Flächen. Zwei mögliche Erklärungsansätze bestehen. Entweder die Flächen werden durch SplitFX überschätzt und sind in Wahrheit kleiner oder die Methode, nach der Ellipsenflächen aus den Kluftspurlängen quantifiziert werden, ist fehlerhaft und schätzt die Kluftfläche zu niedrig ab. Ein Blick auf Tabelle 5.16 offenbart, dass ausschließlich die WNW-ESE Schar eine Ellipsenhauptachsenlänge besitzt, die kleiner als die Kluftspurlänge ist. Die längste Achse der Ellipse kann aber logischerweise nicht kürzer sein als die Kluftspurlänge, auf deren Grundlage die Achsenlänge berechnet wird. Denn die Kluftspurlänge ergibt sich einzig aus der Verschneidung der Ellipse mit der Aufschlusswand.

Erklärungen liefert beispielsweise die hier vorgestellte Methode. Es liegt keine wahre Quantifizierung von Kluftspuren vor, sondern es werden künstliche Kluftspuren durch die Erstellung einer Hilfsfläche erzeugt. Die Verschneidung erfolgt ausschließlich mit der sichtbaren Kluftfläche. Da diese kleiner ist als die eigentliche Kluftfläche, könnte hier schon ein zu geringes Abschätzen der Kluftspurlängen vorliegen. Allerdings besteht das Problem weniger in zu kurzen Kluftlängen als vielmehr in der Umrechnung der Kluftspurlängen in Hauptachsenlängen der Ellipsen. Eine mögliche Erklärung ist, dass die zugrunde liegende Kluftform nicht der einer Ellipse entspricht und so eine Abschätzung der Form als Ellipse fehlerhaft sein könnte.

Ein Überschätzen der Kluftgrößen durch SplitFX, die hier als Vergleichswert dienen, ist unwahrscheinlich. Eher neigt die Methode dazu Flächengrößen zu unterschätzen (solange die Parameter des Algorithmus richtig gesetzt sind). Zudem können die erkannten Flächen visuell überprüft werden (siehe Abbildung 5.30). Auch dort passen Geländebeobachtungen der Klüfte gut mit den detektierten Kluftflächen in der Punktwolke überein.



**Abbildung 5.30** Triangulierte Punktwolke des Beispielaufschlusses Rockenau (in SplitFX). Die grün umrandeten Markierungen zeigen die identifizierten Kluftflächen.

Die Berechnung der Rechtecke beruht einzig auf den Ellipsenberechnungen. Darum wird diese erste Verzerrung als Fehler fortgeführt und auch die Rechtecke des WNW-ESE sind in Relation zu klein. Eine direkte Abschätzung der Rechteckgröße auf Grundlage der Kluftspurlängen wäre wünschenswert, da eventuell Rechtecke die echte Form der Klüfte besser annähern. Unabhängig von der Berechnung der Ellipsen verläuft die Abschätzung der Kreisradien und der zugehörigen Kreisflächen. Sie wird direkt in Fracman oder über Anwendung der Formeln nach (Zhang und Einstein 2000) (siehe auch Tabelle 2.1) berechnet. Der relative Trend dieser Kreisflächen der einzelnen Scharen entspricht dem Trend der Flächenbestimmung aus SplitFX. Die WNW-ESE Schar hat demnach die größte Fläche, gefolgt von der NW-SE und NE-SW, deren Kreisflächen deutlich (Faktor 3-4) kleiner sind.

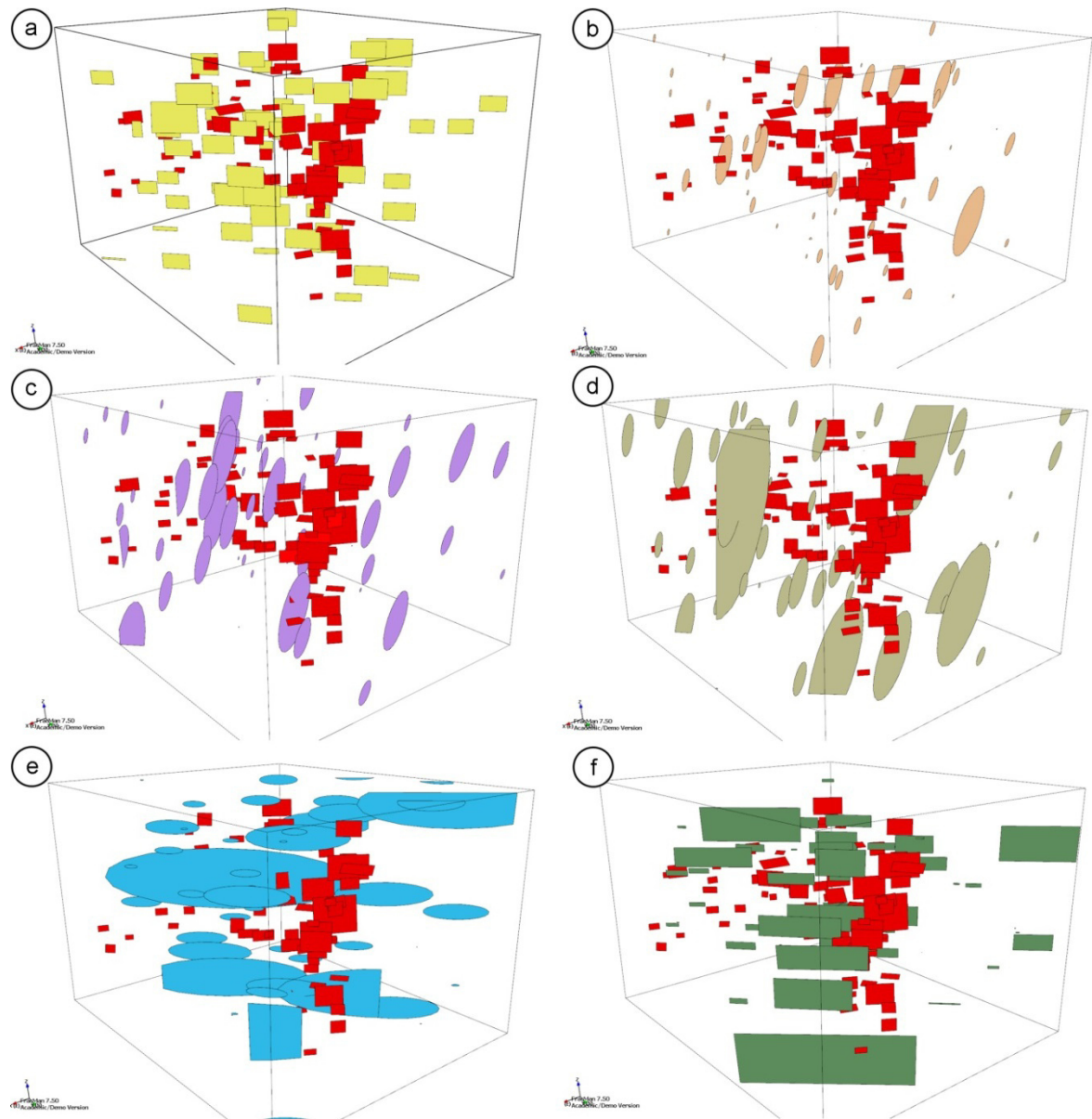
Die berechneten Flächen der Ellipsen  $A_E$  erscheinen als viel zu klein. Die in Fracman aus dem RANSAC Algorithmus importierten Flächen werden daher auch auf ihre Größe hin untersucht und zeigen deutlich höhere Flächenwerte an als die über die Auswertung der Kluftspurlängen berechneten (Abbildung 5.32, Vergleich der Kurven „Ellipse aus Radius (rosa) und Ausgangsgröße (rot)“). Allerdings gilt es auch festzuhalten, dass die aus dem RANSAC Algorithmus erstellten Flächen die wahre sichtbare Flächengröße leicht überschätzen, da hierbei Rechtecke erstellt werden, die den gesamten Punktbereich einer Fläche umschließen und so zwangsläufig an den Rändern auch Areale mit einbezogen werden, für die keine Punktdaten vorliegen.

### ***Transfer der Ergebnisse in ein DFN Modell***

Neben der reinen Quantifizierung der Größe und Bestimmung der Form der Kluftflächen sollen die Ergebnisse dazu beitragen ein DFN Modell zu erstellen. Aufgrund der zahlreich gewonnen Daten kann die statistische Signifikanz des Modells erhöht werden. Die Kluftgröße wird in ein DFN Modell über die Kluftlänge bestimmt. Eine flächenhafte Größe kann nicht direkt als Input eines Modells dienen.

Der Input erfolgt in Fracman als Radius einer Fläche („Equivalent Radius“), dessen Verteilungsparameter eingegeben werden. Durch die zwei vorgestellten Methoden sind mehrere mögliche Quantifizierungen von Kluftgrößen- und -längen ermittelt. Im Folgenden wird veranschaulicht und diskutiert, welche dieser Parameter zur Anwendung auf ein DFN Modell zweckdienlich erscheinen. Die Software Fracman basiert darauf, dass der Kreisradius einer definierten Fläche angegeben wird. Die Form lässt sich über die Anzahl der Eckpunkte angeben, denn die aus der Länge erzeugten Flächen sind Polygone. Eine hohe Anzahl an Eckpunkten entspricht dabei einer Annäherung der Form an einen Kreis. Da zusätzlich das Achsenverhältnis (aspect ratio) angegeben werden kann, ist auch die Darstellung von Ellipsen möglich. Rechtecke werden durch 4 Eckpunkte erzeugt. Die Flächengröße entspricht dabei immer der initialen Kreisfläche, die aus dem angegebenen Radius errechnet wird. Die Tabelle 5.16 enthält eine Übersicht aller quantifizierter Kluftlängen und –größen. Für die Kluftchar NE-SW werden exemplarisch einige Werte gewählt und in ein DFN Modell integriert. Abbildung 5.31 stellt eine Übersicht dieser DFN Modelle dar. Dort sind die über den RANSAC Algorithmus identifizierten Flächen der Schar NE-SW als rote Rechtecke gekennzeichnet. Aus einigen Parametern werden nun stochastische Klüfte modelliert, die die gleiche Raumlage besitzen. Vereinfachend wird eine feste Kluftanzahl von 60 gewählt. Aus der Methode 1 kann entweder der Parameter  $l_{max}$  als Äquivalent der Kluftlänge gewählt und als Inputparameter für das DFN Modell genutzt werden oder aber die über SplitFX ermittelte Flächengröße, aus der rückwirkend ein Radius berechnet wird. Aufgrund verschiedener Problematiken bei der Bestimmung der Flächengröße über SplitFX (vergleiche Kapitel 5.2.8), wird auf diesen Flächenwert verzichtet. Da beispielsweise die Geometrie der zugrundeliegenden Fläche unbekannt ist, kann nur schwer ein Längenwert, beispielsweise die Länge einer Diagonalen, bestimmt werden. Zudem ist diese Methode umständlicher und erfordert zusätzliche Rechenschritte und Annahmen. Der Parameter  $l_{max}$  hingegen kann, unterstützt durch den Höhenparameter  $h_{max}$ , genutzt werden, um auf die Geometrie der aufgeschlossenen Kluftflächen zu schließen. Die Ergebnisse der Modellierung des Parameters  $l_{max}$  sind in Abbildung 5.31a dargestellt (gelbe Flächen). Um nicht nur visuell die Flächen miteinander zu vergleichen, sind auch kumulative Verteilungsfunktionen der Ausgangsflächen (rot) und simulierten Flächen (gelb) erstellt und zum Vergleich in ein Diagramm geplottet (Abbildung 5.32). Auch weitere Größenparameter sind in DFN Modelle integriert. Darunter die durch Methode 2 quantifizierten Ellipsenflächen, die sich aus der Untersuchung der Kluftspurlängen  $\mu_l$  ergeben (Abbildung 5.31b). Aus der Flächengröße wird der entsprechende Radius eines Kreises gleicher Größe errechnet und als Eingabeparameter für das DFN Modell verwendet. Schlussendlich werden die ermittelten Werte der Neigung der Hauptachse der Ellipse und das Achsenverhältnis  $k_e$  angewendet. Ellipsen gleicher Ausrichtung und mit gleichem Achsenverhältnis werden auch aus der Kluftspurlänge  $\mu_l$  und der Länge der Ellipsenhauptachse  $\mu_a$  erstellt (Abbildung 5.31 c+d). Es erfolgt keine weitere Umrechnung und die Werte werden direkt als Eingabeparameter (Radius) genutzt. In der Theorie können, gerade in Sedimentgesteinen, Klüfte eine rechteckige Form annehmen, da sie beispielsweise durch eine Schichtung oder andere geologische Strukturen in ihrer Ausdehnung begrenzt sind. Eine eigentlich elliptische Form kann durch diese Abgrenzung annähernd die Form eines Rechtecks erhalten. Basierend auf diesem theoretischen Ansatz sind zwei horizontal ausgerichtete Klüfte in das DFN Modell integriert (Abbildung 5.31 e+f). Zum einen sind das Ellipsen, deren Eingabeparameter der Hauptachsenlänge  $\mu_a$  entsprechen und zum anderen Rechtecke, deren Eingabeparameter der Kluftspurlänge  $\mu_l$  gleichkommen..



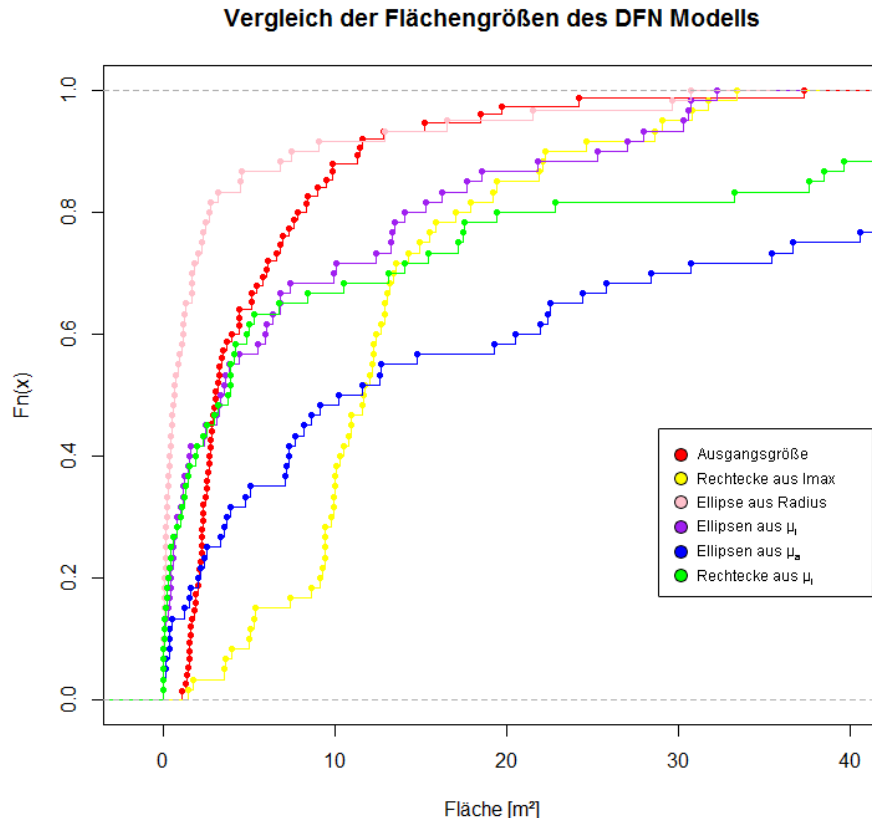


**Abbildung 5.31** Erstellte DFN Modelle der NE-SW Schar des Steinbruchs Rockenau. Erkannte Kluftflächen sind in das Modell als rote Rechtecke integriert. Zusätzlich werden je 60 stochastische Kluftflächen auf Grundlage der durchgeführten Größenberechnungen als Rechtecke oder Ellipsen simuliert. a) Nutzung des Parameters  $I_{\max}$  aus Methode 1 zur Erstellung von Rechteckflächen. b) Eingabeparameter ist hier ein Radius, der aus den berechneten Ellipsengrößen quantifiziert wurde, Neigung  $\gamma$  und Achsenverhältnis  $k$  wurden aus den zugehörigen Berechnungen übernommen. c) Ellipsen mit Radius  $\mu_1$ . d) Ellipsen mit Radius  $\mu_2$ . e) Radius wie in d, aber horizontale Ausrichtung. f) Horizontale Rechtecke aus  $\mu_1$ .

Eine erste optische Beurteilung lässt den Schluss zu, dass die Ellipsen unter b (Abbildung 5.31) als zu klein erscheinen, um als Basis der roten Rechteckflächen, die im Aufschluss sichtbar sind, zu dienen. Zur weiteren quantitativen Vergleichbarkeit sind in Abbildung 5.32 die kumulativen Flächengrößen der einzelnen, modellierten Kluftflächen aufgeführt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Ellipsen (rosa) kleinere Flächengrößen aufweisen als die Ausgangsflächen (rot). Unter der Prämisse, dass die simulierten Flächen größer sein müssen als die Ausgangsflächen, wird dieser Ansatz verworfen. Die Ellipsen des DFN Modells c liegen eher im Bereich der roten Rechtecke. Tendenziell überschreiten sie die Größe der roten Flächen aber erst im Bereich größerer Kluftflächen. Zudem erscheint es als unwahrscheinlich, dass sich aus den eher schmalen Ellipsen mit vorgegebener Neigung die etwas größeren roten Rechtecke gebildet haben könnten. Behält man die Neigung und das Achsenverhältnis bei, so ist Ansatz d vielversprechender. Ihre Flächengröße (Abbildung 5.32 in blau) liegt deutlich über der der roten Ausgangsflächen. Es ist gut vorstellbar, dass sie der Ursprung der roten Flächen sind. Besser noch passen die Ellipsen, wenn ihre Ausrichtung horizontal ist (unter e). Begrenzt durch die

fast horizontale Schichtung und die orthogonale Kluftschar NW-SE erzeugen diese Ellipsen sehr passend die roten Rechtecke. Gleiches gilt für den Fall f. Statt Ellipsen sind hier direkt Rechtecke erzeugt worden, allerdings nicht aus dem Eingangsparameter  $\mu_a$  sondern dem kleineren  $\mu_l$ . Trotzdem sind auch sie eine gute Annäherung.

Die im Abschnitt zuvor dargestellten, modellierten Klüfte basieren alle auf Parametern, die mit Methode 2 (siehe Tabelle 5.16) berechnet werden. Einzig das Kluftmodell a (Abbildung 5.31) basiert auf dem Parameter  $l_{max}$  aus Methode 1. Die Rechtecke gleichen optisch den Ausgangsflächen, sind jedoch im Schnitt etwas größer (Abbildung 5.32). Gerade kleine Flächen kommen kaum vor. Sie sind als Abbildung der Ausgangsklüfte in einem DFN Modell geeignet. Zusammenfassend sind neben der Modellierung nach a auch d, e und f potentiell geeignete Methoden für die Darstellung von Klüften in einem DFN Modell.



**Abbildung 5.32** Die berechneten kumulativen Verteilungen der Flächengrößen aus den Kluftflächen verschiedener, untersuchter DFN Modell sind in diesem Diagramm farblich aufgetragen.

Eine eindeutige Aussage darüber, welche Methode richtig ist, kann nicht getroffen werden. Hält man sich streng an die aus der Literatur (Zhang et al. 2002) in Kapitel 2.5.4 vorgestellte Methode, so erhält man keine zufriedenstellenden Ergebnisse (Abbildung 5.31 b). Die direkte Nutzung der aufgenommenen Kluftspurlängen  $\mu_l$  (f) scheint ausreichend bei Methode 2, ohne diese erst weiter umzurechnen. Auch Methode 1 liefert über den Parameter  $l_{max}$  einen möglichen Eingabeparameter, auch wenn insgesamt die Abschätzung als zu gering erscheint. Die Frage verbleibt, um welchen Faktor die eigentlichen Kluftflächen größer sind, als die im Aufschluss sichtbaren. Weiterhin lässt die Form der Flächen, die im Aufschluss erkennbar ist, keinen Rückschluss auf die wahre, nicht sichtbare Form der Klüfte zu.

### Fazit

Es lässt sich feststellen, dass Methode 2 am geeignetsten erscheint, da sie keine Triangulation der Punktwolke erfordert und eine Vielzahl an Ergebnissen liefert. Die erkannten Flächen lassen sich nur bei dieser Methode direkt in ein DFN Modell übertragen und weiter auswerten. Hierbei gilt es bei der Erstellung des DFN Modells zu beachten, dass der Kluftspurwert  $\mu_l$  als Inputwert (Equivalent Radius) zu benutzen ist.

### 5.3 Intensität

In Kapitel 2.7 werden die verschiedenen vorhandenen Termini zur Klüftigkeit aufgeführt und ihre Geländebestimmung erläutert. Nachfolgend wird ein Verfahren eingeführt, mit dem es möglich ist, aus einer Punktwolke Informationen über die Klüftigkeit und die Abstände zwischen Klüften zu bekommen. Methoden werden vorgestellt, mit denen die Auswertung der Intensität und Abstände aus Punktwolken durchführbar sind und anschließend miteinander verglichen. Die Methodik wird am Römersteinbruch (s. Kapitel 4.1.1) erprobt.

#### 5.3.1 Auswertung der Intensität in Punktwolken

Im folgenden Kapitel wird eine Methode vorgestellt, die traditionelle Quantifizierungen der Kluftintensität auf dreidimensionale Punktwolken überträgt. Hierbei wird das Augenmerk auf eine möglichst weitgehende Automatisierung der Arbeitsschritte gelegt, da die bisherigen Methoden vor allem einen hohen manuellen Einsatz des Bearbeiters voraussetzen.

Die bisher in der Literatur zu findenden Methoden erfordern generell einen manuellen Einsatz. Zur Quantifizierung der Kluftintensität wird die Scanline-Methode auf die Punktwolken übertragen, um den Intensitätsparameter  $P_{10}$  zu bestimmen. Entlang einer eindimensionalen Linie werden die Anzahl und Abstände der zur Kluftschar gehörenden exponierten Flächen aufgenommen. Die Flächen werden hierbei entweder als Kreise oder Ellipsen angenähert. Eine andere Möglichkeit besteht darin, eine virtuelle gerade Linie bzw. Polyline zu konstruieren und die Schnittpunkte dieser Linie mit manuell konstruierten Flächen zu zählen, um die Kluftintensität  $P_{10}$  abzuleiten; ebenso können dabei die Abstände abgemessen werden (Fekete et al. 2010).

Ausgehend von dieser Methode wird in der vorliegenden Arbeit ein Ansatz entwickelt, der eine semi-automatische Auswertung des  $P_{10}$  Parameters direkt aus der Punktwolke zulässt.

Die vorgestellte Methode basiert auf 5 Schritten:

- Identifizierung von Flächen und Quantifizierung ihrer Größe in der Punktwolke
- Einteilung der Flächen in Kluftscharen
- Erstellen von Scanlines
- Ermittlung der Schnittpunkte der Flächen mit der Scanline
- Festlegung der geometrischen Form der Flächen
- Berechnung der Kluftintensität  $P_{10}$

Die Identifizierung der Flächen und deren Quantifizierung wird über zwei unterschiedliche Methoden erreicht, die im Folgenden beschrieben und deren Ergebnisse miteinander verglichen werden. Die weiteren Auswertungsschritte weichen bei beiden Methoden nicht mehr voneinander ab. Die Ergebnisse beider Methoden liefern einen Längenwert. Dieser Längenwert gibt die maximale Ausdehnung der geometrischen Fläche wieder, die identifiziert wurde. Diese (halbierte) Länge gilt als Radius der zu konstruierenden Kreise oder Ellipsen, die stellvertretend für diese Flächen konstruiert werden.

Die Ergebnisse der Flächendetektion werden exportiert und in ein vorgefertigtes Excelskript importiert. Ebenengleichungen werden zu jeder einzelnen Fläche erstellt und anschließend die Schnittpunkte dieser Ebenen mit einer selbst definierten Geraden ermittelt. Die Distanz zwischen Schnittpunkt und Mittelpunkt der Fläche wird berechnet und einer geometrischen Prüfung unterzogen. Entweder liegt der Schnittpunkt in einem Kreis mit Radius  $r$  oder in einer Ellipse mit zusätzlich gegebenen Seitenverhältnissen. Die Radien (Kreise) bzw. Achsenlängen (Ellipse) hängen hierbei von der ursprünglichen Flächengröße ab. Erfüllt ein Schnittpunkt diese Bedingungen, wird dieser „gezählt“ und geht in die Abstandsberechnungen ein. Über Länge der Scanlines und die einzelnen Abstände zwischen den Schnittpunkten wird die Intensität  $P_{10}$  ermittelt. Alle Werte sind durch „Terzaghi“ korrigiert. Anschließend werden die  $P_{10}$  Intensitätswerte in den  $P_{32}$  Wert übertragen.

#### *Identifizierung der Flächen*

Es werden zwei unterschiedliche Methoden zur Bestimmung der Flächen im Raum vorgestellt. Methode 1 beinhaltet die Nutzung eines RANSAC Algorithmus (siehe Kapitel 5.2.3). Einzelne Punkte werden zu rechteckigen Flächen zusammengefasst. Alle 4 Punkte dieser Flächen können exportiert



und sowohl der Mittelpunkt, die Orientierung und die diagonale Länge (und somit die maximale Ausdehnung der Fläche) berechnet.

Bei Methode 2 können in der triangulierten Punktwolke Flächeninformationen mit Hilfe der Software SplitFX gewonnen werden. Dazu gehören Informationen über die Flächengröße, den Schwerpunkt bzw. das Centroid der Fläche, die Orientierung der Fläche über Einfallswinkel und Einfallsrichtung sowie die „Vertices“. Letzteres sind Punkte, die das Polygon der äußeren Umrandung der Fläche beschreiben. Über die Vertices wird die maximale Ausdehnung der Fläche berechnet (siehe auch Kapitel 5.2.2). Dieser Wert gilt als Äquivalent der Flächengröße. Über das Centroid und die Raumlage wird die Fläche exakt im 3D Modell verortet.

Auf Grundlage dieser Informationen aus Methode 1 oder 2 können die Flächen als Kreise oder Ellipsen dargestellt und Schnittpunkte mit einer Scanline ermittelt werden.

### **Berechnung Schnittpunkte**

Die Berechnung der Schnittpunkte erfordert das Erstellen von Strecken im 3D Modell, die als Scanlines dienen. Dazu wird der Anfang und der Endpunkt jeder Scanline im Modell festgelegt. Das geschieht am besten über die Wahl zweier Punkte innerhalb der Punktwolke. Die Linien sollten so gewählt werden, dass sie möglichst viele Flächen der Kluftschar schneiden, deren Intensität ermittelt wird.

Zur Berechnung der Schnittpunkte werden Ebenengleichungen in der Normalform basierend auf den einzelnen Flächen und eine Geradengleichung, die die Scanline präsentiert und aus den definierten Strecken in der Punktwolke entsteht, erstellt. Über Gleichsetzen dieser Formeln lässt sich der Vektor des Schnittpunktes zwischen der Geraden und der Ebenengleichung berechnen. Die Normalenform der Ebene lautet:

$$\vec{n}[\vec{P} - \vec{C}] = 0 \quad n, P, C \in R^3 \quad 5.10$$

mit  $\vec{n}$  als Normalenvektor,  $\vec{P}$  ist der Vektor eines noch unbekannten Punktes in der Ebene und  $\vec{C}$  der Ortsvektor der Ebene.

Die Geradengleichung in Parameterdarstellung mit dem Ortsvektor und Richtungsvektor lautet:

$$\vec{y} = \vec{A} + \lambda \vec{O} \quad y, O, A \in R^3 \text{ \& } \lambda \in R \quad 5.11$$

wobei der Ortsvektor  $\vec{O}$  der Differenz zweier Vektoren der Geraden entspricht, die frei definiert werden können:

$$\vec{O} = (\vec{B} - \vec{A}) \quad O, B, A \in R^3 \quad 5.12$$

Die Vektoren  $\vec{B}$  und  $\vec{A}$  sind folglich der Anfangs- und Endpunkt der manuell gewählten Scanline in der Punktwolke.

Aus dem Gleichsetzen der beiden Gleichungen ergibt sich für den Ortsvektor  $\vec{S}$  des Schnittpunktes:

$$\vec{S} = \vec{A} + \frac{\vec{n} * (\vec{C} - \vec{A})}{\vec{n} * (\vec{B} - \vec{A})} (\vec{B} - \vec{A}) \quad n, A, B, S, C \in R^3 \quad 5.13$$

Sowohl  $\vec{n}$  als Normalenvektor und Orientierung als auch  $\vec{C}$  (Mittelpunkt der Fläche) sind als Ausgangsdaten vorhanden. Somit kann der notwendige Schnittpunkt der Ebene und der Geradengleichung berechnet werden. Die beiden Vektoren  $\vec{B}$  und  $\vec{A}$  sind frei wählbar und obligatorisch. Diese Vektoren bestimmen Orientierung der Scanline im Aufschluss und liegen auf eben dieser.

Die Berechnungen in Excel müssen getrennt für die 3 Raumrichtung x, y und z vorgenommen werden, da Excel nicht für Rechnungen mit Vektoren ausgelegt ist. Zunächst werden separat die Subtraktion und das Skalarprodukt des Zählers und Nenners berechnet. Der resultierende Faktor wird mit dem Ortsvektor multipliziert und anschließend zum Vektor  $\vec{A}$  addiert. Das Ergebnis ist der Vektor des Schnittpunkts  $\vec{S}$  (in den Komponenten  $S_x$ ,  $S_y$  und  $S_z$ ).

Der Schnittpunkt der Geraden mit der Ebene kann überall im 3D Raum liegen. Auf der Ebene werden geometrische Flächen konstruiert, die die Kluftfläche repräsentieren (siehe Abbildung 5.33). Der Mittelpunkt beider Flächen ist identisch. Sowohl der Abstand des Mittelpunktes zum Schnittpunkt als auch der Abstand des Mittelpunktes zum Rand der geometrisch gewählten Fläche in gleicher Richtung müssen bestimmt werden. Der Abstand zum Schnittpunkt lässt sich direkt berechnen unter Zuhilfenahme der euklidischen Distanz (bzw. des euklidischen Abstands):

$$d(S, C) = \|S - C\|_2 \quad d, S, C \in R^3 \quad 5.14$$

Der Abstand zum Rand der geometrischen Form hängt davon ab, welche Geometrie - ob Kreis oder Ellipse - gewählt wurde. Die Berechnung dieses Abstands ist in den folgenden Abschnitten erläutert. Bei der Erstellung der zugrunde liegenden Geometrien Kreis und Ellipse ist es wichtig, dass beide die identifizierte Kluftfläche mindestens komplett umschließen oder sogar größer sind. Eine sporadische Bedeckung ist nicht zweckmäßig, da es so zwangsläufig zu einem Unterschätzen der Kluftintensität kommt, weil die Gesamtzahl der Schnittpunkte sinkt und einzelne, eigentlich relevante, Klüfte unberücksichtigt bleiben.

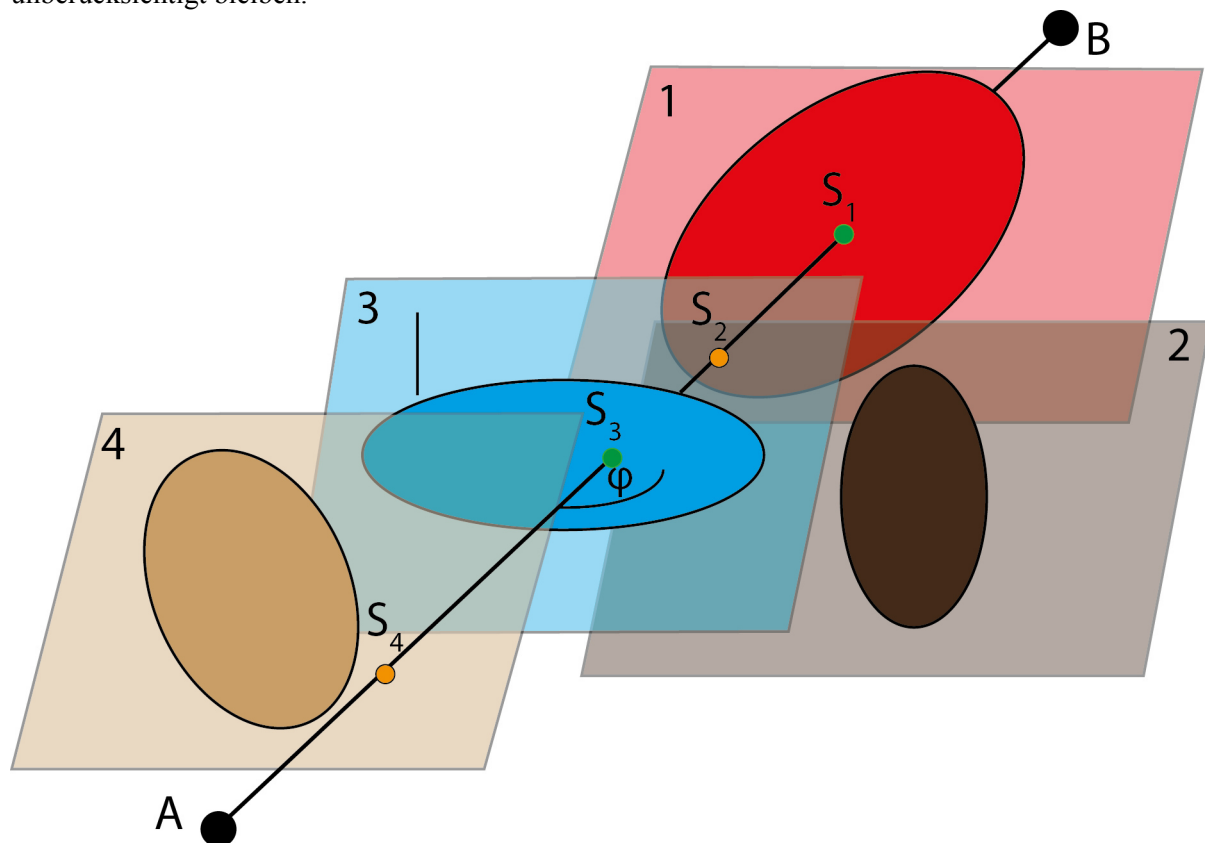


Abbildung 5.33 Illustration der Scanline von den gewählten Punkten A zu B durch die Ebenen 1-4. Nach Berechnung der Schnittpunkte  $S_1 - S_4$ , wird eine geometrische Form auf der Ebene konstruiert, die der in der Punktwolke

identifizierten Kluftfläche entspricht und den gleichen Mittelpunkt hat. In diesem Beispiel sind Ellipsen konstruiert. Die Schnittpunkte S2 und S3 liegen außerhalb der Ellipsen, S1 und S3 innerhalb der Ellipsen. Zwischen diesen beiden wird der Kluftabstand bestimmt. Über den Winkel  $\varphi$  kann der Abstand nach Terzaghi (Terzaghi 1965) korrigiert werden.

### ***Berechnungen der Intensität mit Hilfe von Kreisflächen***

Mathematisch wird in die jeweiligen Ebenen eine geometrische Form konstruiert, beispielsweise ein Kreis, um die Kluft idealisiert darzustellen. Die Mittelpunkte der Kreise sind dabei jeweils identisch mit den Mittelpunkten der identifizierten Klüfte. Die Kreise haben die gleiche Orientierung wie die entsprechenden Ebenen, in denen sie liegen.

Aus den beiden vorgestellten Methoden der Flächenidentifizierung stehen 2 Parameter zur Verfügung. Beide sind ein Maß der diagonalen Länge bzw. maximalen Ausdehnung der zugrunde liegenden Form. Daher werden sie fortan konform als Länge  $l$  bezeichnet. Der Radius  $r$  der Kreise entspricht dann der halben Länge:

$$r = \frac{l}{2} \quad 5.15$$

Aus der Prüfung der Längenverhältnisse des Radius  $r$  zum euklidischen Abstand  $d$  von Schnittpunkt zum Mittelpunkt  $C$  in der jeweiligen Ebene lässt sich ermitteln, ob der Schnittpunkt von Scanline und Ebene innerhalb des definierten Kreises liegt (Abbildung 5.8). Ist  $r < d$ , so liegt der Schnittpunkt außerhalb des Kreises und wird nicht weiter berücksichtigt. Sollte  $r > d$  sein, liegt der Schnittpunkt der Scanline mit der Ebene innerhalb der gedachten Kreisfläche. Dieser wird dann übernommen und der Abstand zum folgenden Schnittpunkt ermittelt. Dieses Vorgehen wird für alle Schnittpunkte wiederholt.

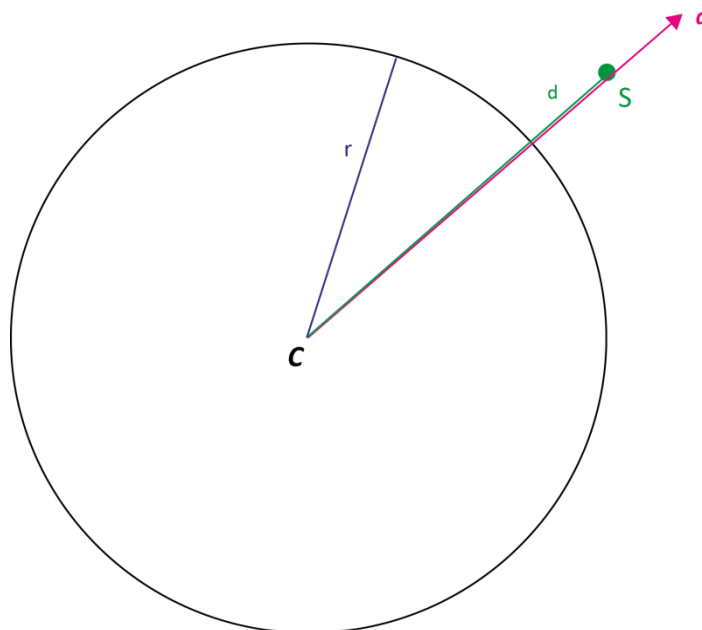


Abbildung 5.34 Grafische Darstellung der erstellten Kreisfläche. Vom Mittelpunkt  $C$  wird der Abstand  $d$  zum Schnittpunkt  $S$  bestimmt (in Richtung des Vektors  $d$ ). Ebenso wird der Radius  $r$  bestimmt, der der halben Länge der maximalen Flächenausdehnung entspricht. Über einen Vergleich der Längen von  $r$  zu  $d$  lässt sich feststellen, ob der Schnittpunkt  $S$  innerhalb oder außerhalb des Kreises liegt.

Alle Abstände müssen noch nach Terzaghi (Terzaghi 1965) korrigiert werden, um den wahren Abstand zwischen den Klüften zu ermitteln. Dazu wird zusätzlich der Winkel zwischen der Orientierung der Scanline ( $\vec{O}$ ) und dem Normalenvektor der Fläche ( $\vec{n}$ ) bzw. Ebene berechnet. Dieser Winkel ergibt sich aus dem Kreuzprodukt beider Komponenten:

$$\cos \epsilon = \vec{O} \cdot \vec{n} \quad 5.16$$

Über den Faktor  $\epsilon$  werden die Distanzen bzw. Abstände  $d$  korrigiert und ergeben so den wahren Abstand zwischen 2 Klüften:

$$d(korr) = d * \sin(\epsilon) \quad 5.17$$

Hierbei wird nur die Summe der gesamten Distanzen korrigiert und nicht jeder Wert einzeln. Durch Addition der Abstände ergeben sich ein Gesamtabstand und die Länge der Scanline vom ersten bis zum letzten Schnittpunkt. Die Division der Schnittpunkte durch die Gesamtlänge resultiert in dem eindimensionalen Intensitätswert der Klüftung  $P_{10}$ .

### ***Berechnung der Intensität mit Ellipsen***

Um der theoretisch angenommenen Ausbreitungsform von Klüften gerecht zu werden, können auch Ellipsen statt der Kreise konstruiert werden. Die Vorgehensweise ist hier analog zu der methodischen Auswertung mit Kreisflächen. Allerdings gestalten sich die Konstruktion der Ellipsen selbst und die Definition der Distanz zwischen Mittelpunkt und äußerem Rand der Ellipse als diffiziler. Wiederum müssen als erstes die Schnittpunkte der Scanline mit den Ebenen auf den detektierten Flächen erstellt werden.

Eine Ellipse wird über ihre Hauptachse  $a$  und Nebenachse  $b$  beschrieben (Abbildung 5.36). Die äußere Form der Ellipse wird über das Seitenverhältnis  $k_e = \frac{a}{b}$  bestimmt. Dieses Seitenverhältnis (engl. „aspect ratio“) kann frei gewählt werden, beispielsweise basierend auf Erfahrungswerten und idealen Modellvorstellungen oder auch auf den Seitenverhältnissen der im Aufschluss exponierten Kluftfläche. Die Länge der Achse  $b$  soll genügend groß gewählt werden, so dass die Ellipse realistisch die Kluftfläche widerspiegelt.

Zur weiteren Konstruktion der Ellipse muss ihre Ausrichtung festgelegt werden. Dies geschieht über einen erstellten Vektor  $q$ , der auf der Achse  $a$  der Ellipse liegt (Abbildung 5.36). Der Vektor  $q$  muss sowohl in der Ebene als auch im Centroid der Ellipse und somit der detektierten Trennfläche liegen. Wie bei den Kreisflächen wird nun auch hier die Entfernung von Mittelpunkt zu Schnittpunkt  $d$  mit dem Maximalabstand zum Ellipsenrand  $r$  verglichen. Werte von  $r$  größer als  $d$  führen hier zu einem positiven Wert und einem realen Schnittpunkt mit der Ellipsenfläche. Der Vektor  $\vec{d}$  und seine Länge  $d$  definieren sich aus den beiden Vektoren  $S$  und  $C$ :

$$\vec{d} = \vec{S} - \vec{C} \quad 5.18$$

$$d = \|\vec{d}\| \quad 5.19$$

Zur genauen Beschreibung der konstruierten Ellipsen gehört zwingend das Festlegen ihrer Ausrichtung. Aufgrund dieser Tatsache wird zur Vereinfachung angenommen, dass die zugehörigen Achsen  $a$  der Ellipsen horizontal im Raum liegen. Der resultierende Vektor  $\vec{q}$  parallel bzw. auf  $a$  stehend hat die Form  $\vec{q} = (q_x, q_y, q_z)$ . Dieser Vektor  $q$  muss in der Ebene der Trennfläche liegen. Die Normalenform der Ebene lautet dann:

$$E: 0 = \vec{n} * [\vec{v} - \vec{C}] \quad 5.20$$

Der Vektor  $q$  resultiert also aus der Differenz der beiden Vektoren  $\vec{C}$  und  $\vec{v}$ :

$$\vec{q} = \vec{v} - \vec{C} \quad 5.21$$

Vektor  $\vec{C}$  ist bei der Berechnung bekannt,  $\vec{v}$  dagegen stellt sich als ein noch unbekannter Hilfs-Vektor dar. Dieser erfüllt die Bedingungen auf der Ebene  $E$  zu liegen und den gleichen Höhenwert  $z$  wie der Mittelpunkt  $\vec{C}$  zu besitzen. Aufgrund dieser Horizontalität ist  $v_z = C_z$  und  $q_z$  nimmt den Wert 0 an. Die Komponenten  $v_x$  und  $v_y$  sind zunächst noch unbekannt.

Zur Bestimmung dieser beiden Komponenten wird zur Vereinfachung angenommen, dass entweder  $v_x$  oder  $v_y$  frei wählbar sind. Die Vektoren  $\vec{v}$  und  $\vec{q}$  müssen in der gleichen Ebene  $E$  wie  $C$  liegen und  $\vec{q}$  zusätzlich auf einer horizontalen Linie, die auf  $E$  liegt und durch den Punkt  $C$  verläuft. Während  $\vec{v}$  die Lokalität des Punktes im Raum bestimmt (Ortsvektor), ist  $\vec{q}$  ein reiner Richtungsvektor, der genutzt wird, um eine Winkelbeziehung zwischen der Orientierung von  $q$  und dem Vektor  $d$  zum Schnittpunkt  $S$  zu ermitteln. Dadurch spielt es keine Rolle, wie weit der Punkt  $\vec{v}$  von  $C$  entfernt auf der Geraden durch  $C$  und  $E$  liegt, da sich der relative Winkel zwischen beiden nicht ändert.

Die Berechnungen sind unabhängig davon in welchem Quadranten (Abbildung 5.35) von  $C$  aus betrachtet - innerhalb bzw. außerhalb der Ellipse - der Punkt  $S$  und der Vektor  $d$  liegen, da in der anschließenden Abstandsberechnung die Quadranten der periodischen Sinus- und Kosinusfunktionen herangezogen werden. Diese ergeben für jeden Quadranten die gleichen Werte, ganz gleich ob der Winkel  $\varphi$  (Quadrant 1),  $\varphi+90$  (Quadrant 2),  $\varphi+180$  (Quadrant 3) oder  $\varphi+270$  (Quadrant 4) beträgt.

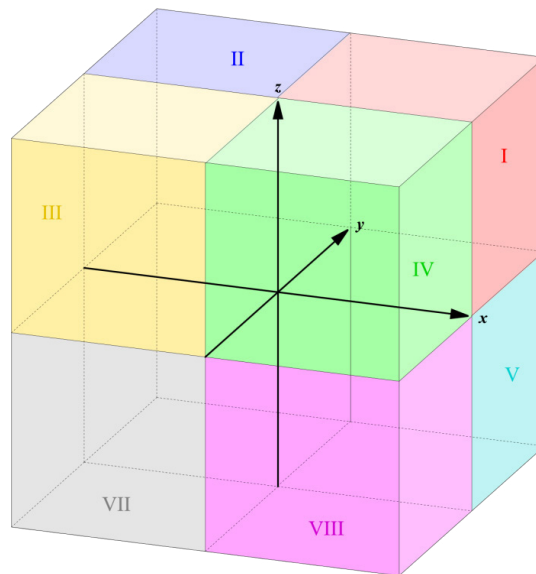


Abbildung 5.35 Visualisierung aller 8 Quadranten in einem kartesischen Koordinatensystem im dreidimensionalen Raum.

Zur Bestimmung von  $\vec{q}$  muss für  $v_x$  ein freier Wert angenommen werden, hierzu wählen wir:

$$v_x = 1 \quad 5.22$$

Nun kann auch  $v_y$  mithilfe der Ebenengleichung berechnet werden:

$$v_y = \frac{n_y C_y - n_x}{n_y} \quad 5.23$$

So kann  $\vec{q}$  aus der Differenz von  $C$  und  $\vec{v}$  bestimmt werden.

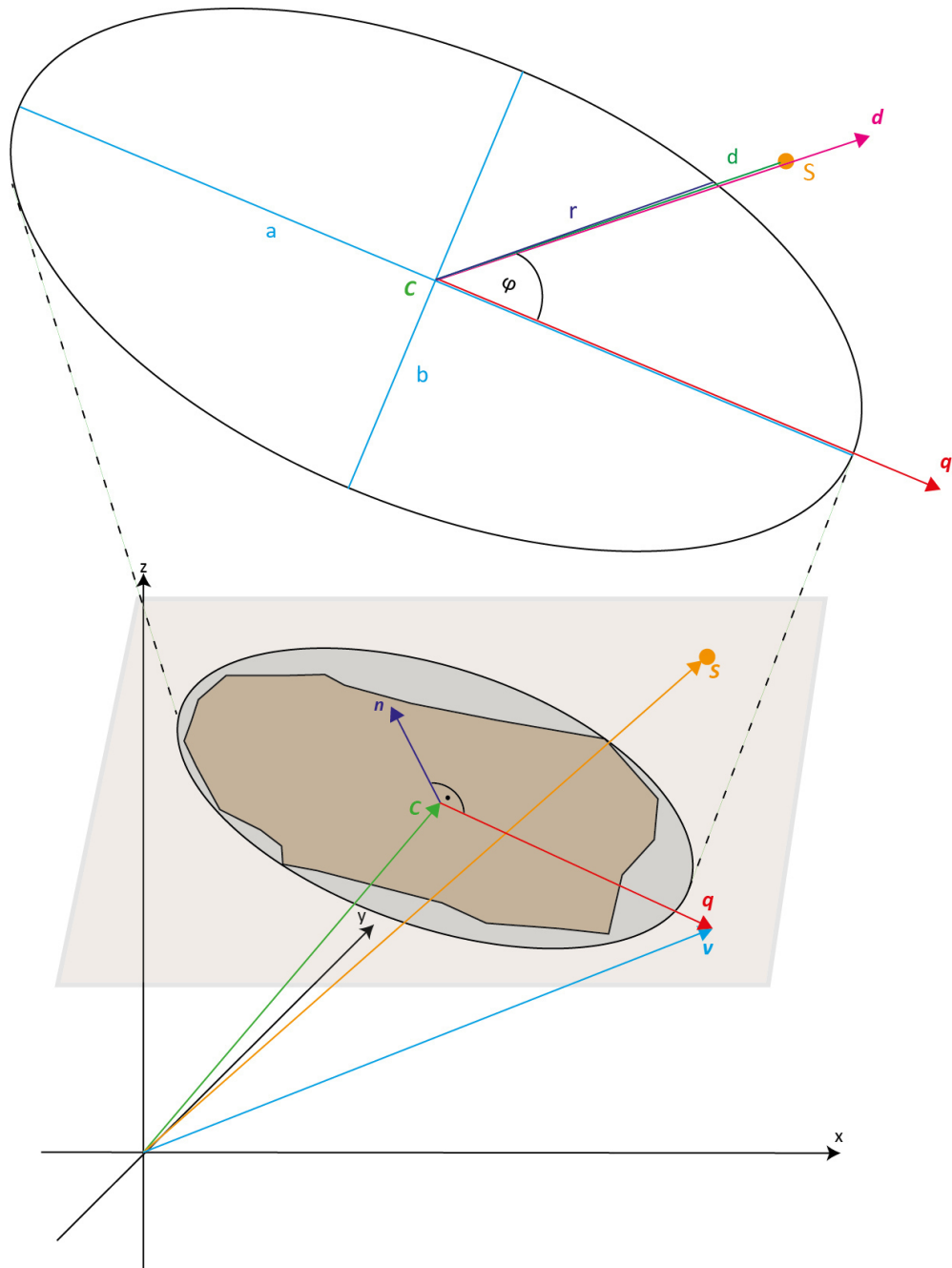


Abbildung 5.36 Detaillierte Darstellung der Ellipsenkonstruktion Vom Mittelpunkt  $C$  wird der Abstand  $d$  zum Schnittpunkt  $S$  bestimmt (in Richtung des Vektors  $d$ ). Ebenso wird der Radius  $r$  bestimmt, der der halben Länge der maximalen Flächenausdehnung entspricht. Über einen Vergleich der Längen von  $r$  zu  $d$  lässt sich feststellen, ob der Schnittpunkt  $S$  innerhalb oder außerhalb der Ellipse liegt. Wichtig ist dabei die Berücksichtigung des Winkels  $\varphi_c$  und des Vektors  $q$ , der die Richtung der Hauptachse  $a$  der Ellipse definiert. Auf der Ebene  $E$  (braun) werden Ellipsen mit dem Mittelpunkt  $C$  konstruiert, deren Ausrichtung über den Vektor  $q$  definiert ist und die aufgeschlossene Kluftfläche komplett umschließen. Dieser wird über den Hilfsvektor  $v$  berechnet, der ebenfalls auf der Ebene  $E$  liegt.

Alternativ bietet sich zur Bestimmung des Vektors  $\vec{q}$  die Nutzung des Skalarprodukts an. Der neue Vektor  $\vec{q}$  liegt orthogonal zum Normalenvektor  $\vec{n}$  der Ebene, wenn dessen Skalarprodukt 0 ergibt. Als weitere Bedingung muss der Vektor  $\vec{q}$  wieder auf einer horizontalen Linie in  $E$  durch den Vektor  $C$  liegen, darum gilt  $q_z = 0$ .

$$\vec{n} * \vec{q} = 0$$

5.24



$$q_y = \frac{-n_x q_x}{n_y} \quad 5.25$$

$$\frac{q_y}{q_x} = \frac{-n_x}{n_y} \quad 5.26$$

Das Verhältnis von  $q_y$  zu  $q_x$  ist gleich dem negativen Verhältnis von  $n_x$  zu  $n_y$ . Durch Wahl eines beliebigen Wertes für  $q_x$ , kann der entsprechende Wert für  $q_y$  bestimmt werden, der die Gleichung erfüllt. Für  $q_x$  wird der Wert 1 angenommen und das zugehörige  $q_y$  entsprechend berechnet.

Im nächsten Schritt muss der Winkel  $\varphi_e$  zwischen dem Vektor  $d$  und dem nun bestimmten Vektor  $q$  ermittelt werden (Abbildung 5.36). Der Winkel zwischen den 2 Vektoren berechnet sich über:

$$\cos \varphi_e = \frac{\vec{q} * \vec{d}}{|\vec{q}| |\vec{d}|} \quad 5.27$$

Mit dem Winkel ist es schlussendlich möglich, den gesuchten Abstand  $r$  zu berechnen:

$$r(\varphi_e) = \frac{ab}{\sqrt{a^2 \sin^2 \varphi_e + n^2 \cos^2 \varphi_e}} \quad 5.28$$

Eine freie Orientierung der Ellipsenachsen wird allein über den Vektor  $q$  erreicht. Dieser bestimmt die Ausrichtung der Achsen. Beispielsweise besteht die Möglichkeit die Ausrichtung der Ellipse entlang der längsten Ausbreitung bzw. Achse der aufgeschlossenen Trennfläche festzumachen. Wird ein vorgegebener Vektor  $q$  verwendet, entfällt - wie beim horizontalen Fall - die Hilfsberechnung über den Vektor  $v$ . Ein mögliches Szenario ist die Wahl des Vektors  $q$  entlang der längsten Achse der jeweiligen exponierten Fläche.

### 5.3.2 Berechnung des $P_{32}$ Wertes aus $P_{10}$ Daten

Auf der Grundlage der Arbeit Wangs (Wang 2005) ist es durch Umrechnungen möglich aus dem gegebenen Intensitätsparameter  $P_{10}$  oder  $P_{21}$  den zugehörigen  $P_{32}$  Wert zu ermitteln. Nötige Ausgangsdaten der zu untersuchenden Kluftschar sind hierbei:

- $P_{10}$  Wert der Kluftschar
- der Fisher Mean Pole (beziehungsweise der durchschnittliche Orientierungsvektor einer Kluftschar) als Vektor  $R$
- die Orientierung der Scanline über den Vektor  $O$
- und die Fisher  $\kappa$  Variable.

Die Ermittlung des  $P_{10}$  Wertes erfolgt nach den Auswertemethoden, die in Kapitel 5.3.1 detailliert beschrieben sind.

Der „Fisher Mean Pole“  $R$  (Abbildung 5.37) ist der mittlere Orientierungsvektor ermittelt aus allen Orientierungsdaten der jeweiligen Kluftschar. Es ist wichtig bei der Berechnung dieses Orientierungsvektors nur Vektoren miteinzubeziehen, die der Kluftschar wirklich eindeutig zuzuweisen sind. Die Mittelwerte der einzelnen Richtungskomponenten der Normalenvektoren der zugehörigen Kluftschar berechnen sich über das arithmetische Mittel (nach Wang 2005).

$$r_x = \sum \frac{n_x}{N}; \quad r_y = \sum \frac{n_y}{N}; \quad r_z = \sum \frac{n_z}{N} \quad 5.29$$

Die Komponenten der Normalenvektoren  $n$  der einzelnen Klüfte lauten hierbei  $n_x$ ,  $n_y$  und  $n_z$ , die Gesamtzahl der Klüfte ist  $N$  und die Komponenten der durchschnittlichen Orientierung  $R$  lauten  $r_x$ ,  $r_y$  und  $r_z$ . Die dazugehörige Länge des Vektors  $R$  lautet:

$$\bar{R} = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + r_z^2} \quad 5.30$$

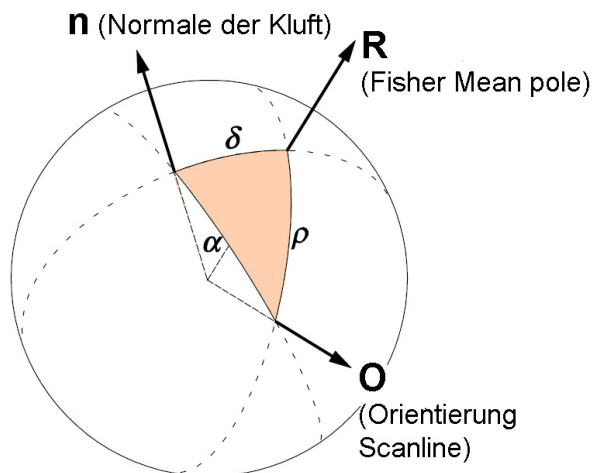
Der normierte Vektor  $R$  lässt sich in seinen einzelnen Komponenten (auch Richtungskosinus) wie folgt beschreiben:

$$R = (R_x, R_y, R_z) \quad 5.31$$

$$R_x = \frac{r_x}{\bar{R}}; \quad R_y = \frac{r_y}{\bar{R}}; \quad R_z = \frac{r_z}{\bar{R}} \quad 5.32$$

Zur Bestimmung notwendig ist zudem der Winkel zwischen den Richtungsvektoren  $R$  und  $O$ , bezeichnet als  $\rho$  (Abbildung 5.37) der für die Berechnung des  $P_{32}$  Wertes notwendig ist. Der Vektor  $O$  ist hierbei die Richtung der Scanline im Raum.

$$\rho = \arccos \left[ \frac{O_x R_x + O_y R_y + O_z R_z}{\sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2} \sqrt{O_x^2 + O_y^2 + O_z^2}} \right] \quad 5.33$$



**Abbildung 5.37** Räumliche Darstellung der zu bestimmenden Parameter für die Berechnung des  $P_{32}$  Intensitätswerts. Die Vektoren der Scanline  $O$ , des Fisher Mean Poles  $R$  und der Normalen der Kluft spannen verschiedene Winkel auf, wobei der Winkel  $\rho$  zu bestimmen ist. (verändert nach Wang 2005).

Zur Berechnung des  $P_{32}$  Wertes wird nach Wang (Wang 2005) folgender Zusammenhang herangezogen:

$$P_{32} = P_{10} * C_{13} \quad 5.34$$

$C_{13}$  ist ein Umwandlungsfaktor und eine Funktion des Winkels  $\rho$  und der Fisher-Konstante  $\kappa$ . Hierbei gilt für den Umwandlungsfaktor  $C_{13}$ :

$$C_{13} = \frac{1}{a * \cos(b\rho) + c} \quad 5.35$$

Der Winkel  $\rho$  ist nach Formel 5.33 bekannt. Der Umwandlungsfaktor  $C_{13}$  ist eine Annäherung an eine Funktion der Regressionskoeffizienten  $a$ ,  $b$  und  $c$  (Abbildung 5.38). Diese Koeffizienten können für  $\kappa > 1$  über eine logarithmische Darstellung berechnet werden:

$$a = 0.1247 \ln(\kappa) + 0.0507 \quad 5.36$$

$$b = -0.1655 \ln(\kappa) + 2.0951 \quad 5.37$$

$$c = -0.0551 \ln(\kappa) + 0.5988 \quad 5.38$$

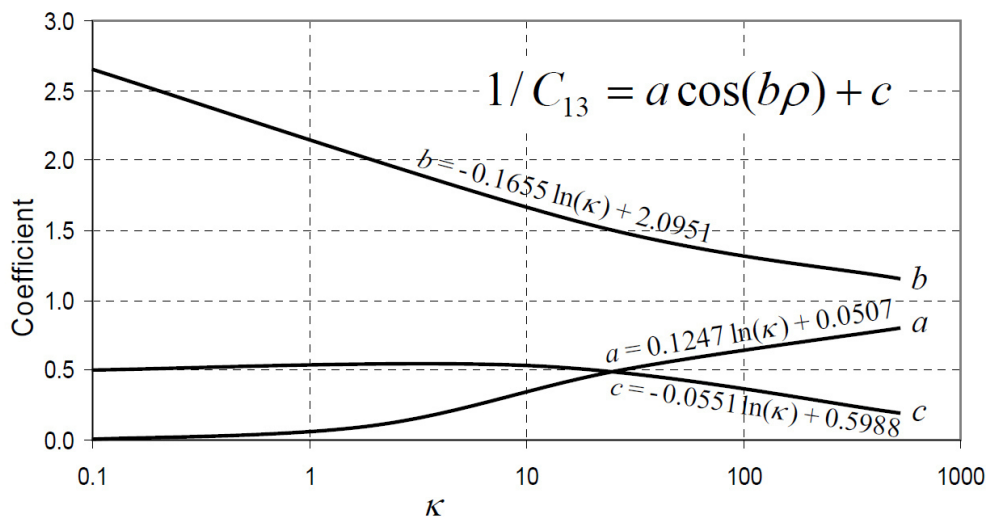


Abbildung 5.38 Darstellung der Funktionen der Koeffizienten  $a$ ,  $b$  und  $c$  in Abhängigkeit der Fisher-Konstante  $\kappa$  zur Berechnung des Umwandlungsfaktors  $C_{13}$  (aus Wang 2005).

Die Fisher-Konstante  $\kappa$  hingegen lässt sich über die Länge des Vektors  $R$  bestimmen, falls  $\bar{R}$  einen Wert größer als 0,65 annimmt (Wang 2005):

$$\kappa = \frac{1}{(1 - \bar{R})} \quad 5.39$$

Für den Fall, dass  $\bar{R}$  kleiner als 0,65 ist, kann die Fisher-Konstante beispielsweise über Stereo32 ausgegeben oder auch in Fracman über das ISIS-Orientierungsmodul bestimmt werden (Golder Associates 1999-2015).

Bei  $\kappa < 1$  liegt eine sehr isotrope Richtungsverteilung einer Kluftschar vor. In diesem Fall kann der  $P_{32}$  direkt angenähert werden über:

$$P_{32} = 2 * P_{10}$$

5.40

### 5.3.3 Quantifizierung der Intensität am Beispielaufschluss

Für die Berechnung der Intensität wird der Römersteinbruch, der bereits als Beispieldatensatz für die Orientierungsberechnung diente, genutzt (Kapitel 4.1.1). Dieser weist ein sehr einfaches, orthogonales Kluftnetzwerk auf. Dieses steht saiger und in Richtung NW-SE und NE-SW. Die 2 Hauptklüftungen werden gewählt, um an ihnen exemplarisch die Berechnung des Intensitätsparameters  $P_{10}$  zu illustrieren. Unterschieden wird hierbei die Methode des RANSAC Algorithmus der die Flächen identifiziert und ihre diagonale Länge als Basis eines Radius heranzieht, von der der Identifizierung durch die Software SplitFX, die Polygone um Flächen konstruiert. Beide Methoden werden einzeln auf die Hauptklüftungsscharen angewendet.

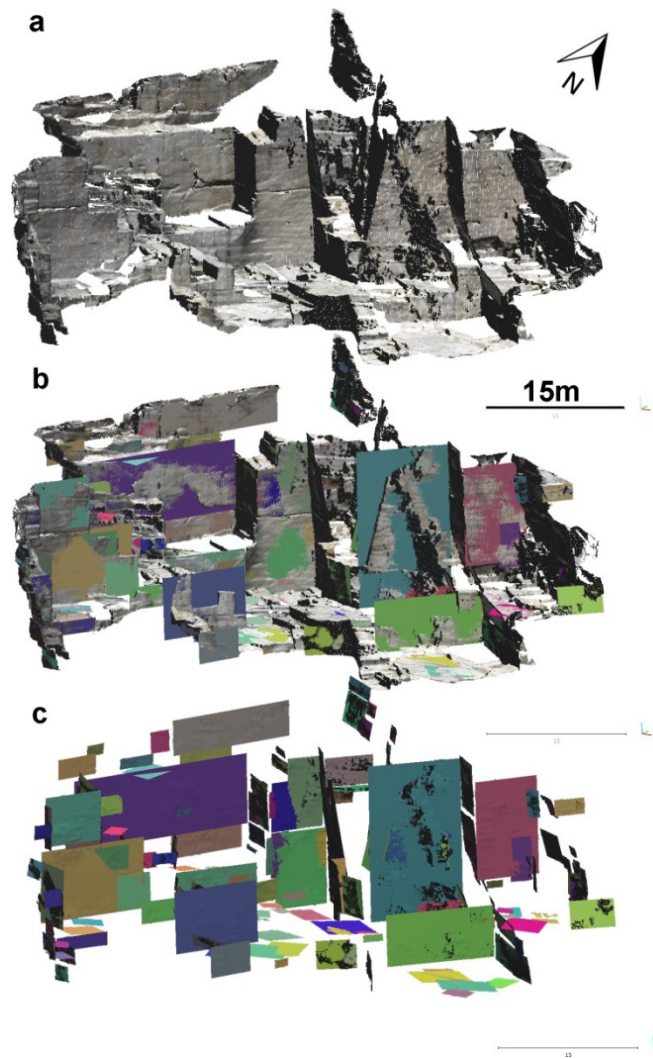
Durch die RANSAC Methode werden 184 Flächen identifiziert (Abbildung 5.39), von denen 52 der Kluftschar NE-SW (Kluftschar 1) und 80 der Kluftschar NW-SE (Kluftschar 2) zugeordnet sind. Die Parameter des Algorithmus sind in Tabelle 5.17 aufgelistet. Diese eignen sich für den vorliegenden Fall am besten und führen zu einer hohen Zahl an Flächen ohne einzelne Flächen doppelt abzubilden, was durch den Algorithmus oft zu verzerrten Ergebnissen führen kann. Nach Export der Eckpunkte aller Flächen werden der Mittelpunkt, die Orientierung und die diagonale Länge bestimmt und somit ein Radius für die geometrische Form festgelegt. Zur Festlegung, welcher Schar die Flächen angehören, müssen aus den Flächennormalen Einfallsrichtung und Einfallswinkel bestimmt und die Daten nach ihrer Orientierung sortiert werden. Die Zugehörigkeit zu einer Schar kann beispielsweise durch eine Clusteranalyse festgelegt sein.

**Tabelle 5.17** Gewählte Parameter für den RANSAC Algorithmus zur Identifizierung der Flächen in der Punktwolke des Steinbruchs Rockenau.

<b>Minimum support points per primitive</b>	100
<b>Maximum distance to Primitive</b>	0,10
<b>Sampling Resolution</b>	0,08
<b>Maximum normal deviation</b>	5°
<b>Overlooking Probability</b>	0,000001

SplitFX detektiert 266 Flächen und damit 82 Flächen mehr als der RANSAC Algorithmus (Abbildung 5.40). Insgesamt werden für die Analyse 73 Flächen der NW-SE und 105 Flächen der NE-SW Schar zugeordnet, das sind 21 bzw. 25 Flächen mehr als durch den RANSAC Algorithmus beigesteuert werden können. Die längste Ausdehnung dieser als Polygone detektierten Flächen wird bestimmt (analog zu 5.2.1) und als Radius herangezogen.

Ein erster Vergleich der Abbildung 5.39 mit Abbildung 5.40 offenbart die Unterschiedlichkeit in der bestimmten Flächengröße. Die Polygone aus SplitFX sind für gleiche Flächen stets signifikant kleiner als die Flächen des RANSAC Algorithmus an gleicher Stelle. Das wirkt sich im Endeffekt auch auf die bestimmten Längen und somit Radien der geometrischen Kreise und Ellipsen bei der Bestimmung von  $P_{10}$  aus.



**Abbildung 5.39** Darstellung der über einen RANSAC Algorithmus detektierten Flächen im Römersteinbruch. a – die Ausgangspunktwolke. b – detektierte Kluftflächen auf der Punktwolke und – c – ohne Punktwolke im Hintergrund. Insgesamt wurden 184 Flächen identifiziert.

Damit ist zu beiden Methoden die Datenbasis gelegt. Die Hälfte der Länge wird als Radius für die Konstruktion der Kreise oder Ellipsen gewählt. Bei der Methode durch SplitFX wird der Radius zusätzlich in einem Durchgang um das 1,5fache erhöht. Das liegt darin begründet, dass sonst die konstruierten Kreise und Ellipsen zu klein sind, um die zugrunde liegende Kluftfläche komplett zu umschließen. Die ursprüngliche Längenabschätzung ist dafür oft zu gering (vergleiche auch Kapitel 5.2.9). Darum teilen sich die Ergebnisse in 3 unterschiedliche Methoden für beide Kluftscharen:

1. Ellipsen und Kreise aus dem RANSAC Algorithmus
2. Ellipsen und Kreise aus den Längen ermittelt in SplitFX
3. Ellipsen und Kreise aus den 1,5fachen Längen ermittelt in SplitFX

Für die Ellipsen wird ein Achsenverhältnis von 2 gewählt, die Hauptachse ist damit doppelt so lang wie die Nebenachse. Die Länge der halben Nebenachse entspricht dem ermittelten Radius. In Abbildung 5.41 ist die Berechnung der Intensität über Ellipsen (nach der Methode 2 über SplitFX) illustriert. Die passenden Ellipsen (türkis) werden zu den Kluftflächen konstruiert und es wird eine Scanline (rot) entwickelt, die die Flächen schneidet. Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse aller 3 Methoden aufgeführt und miteinander verglichen. Wichtig ist die Nutzung unterschiedlich orientierter Scanlines, da die Ergebnisse richtungsabhängig sind.

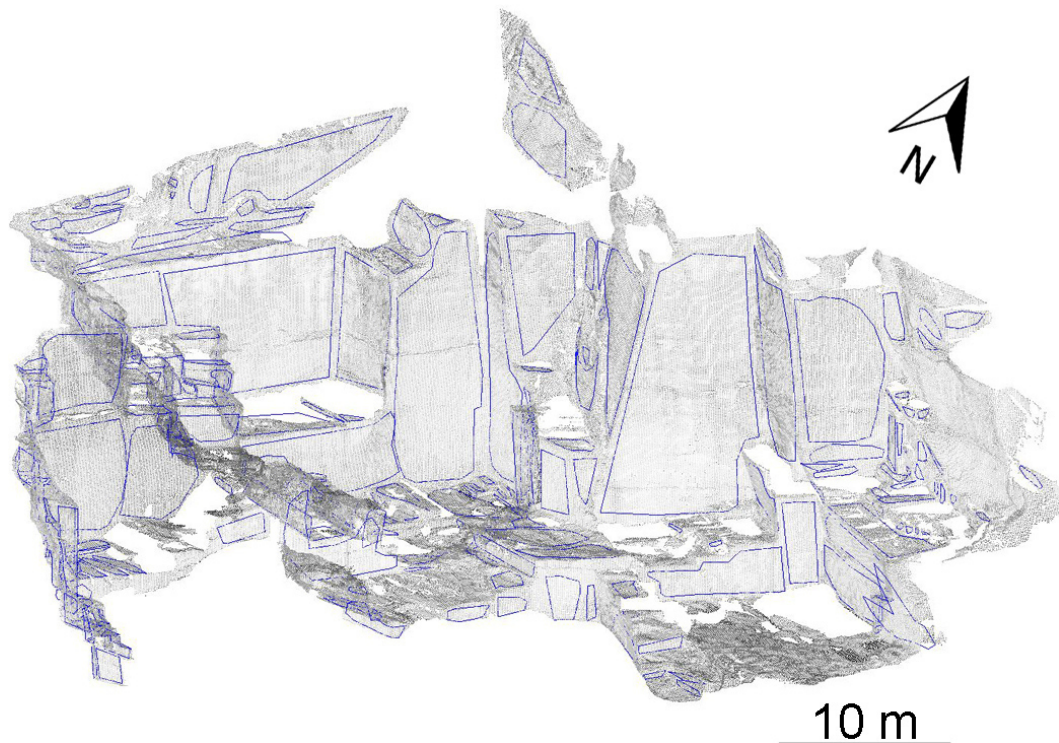


Abbildung 5.40 Durch SplitFX identifizierte Flächen (blau) in der Punktwolke. Insgesamt werden 266 Flächen konstruiert und damit 82 mehr als durch die RANSAC Methode.

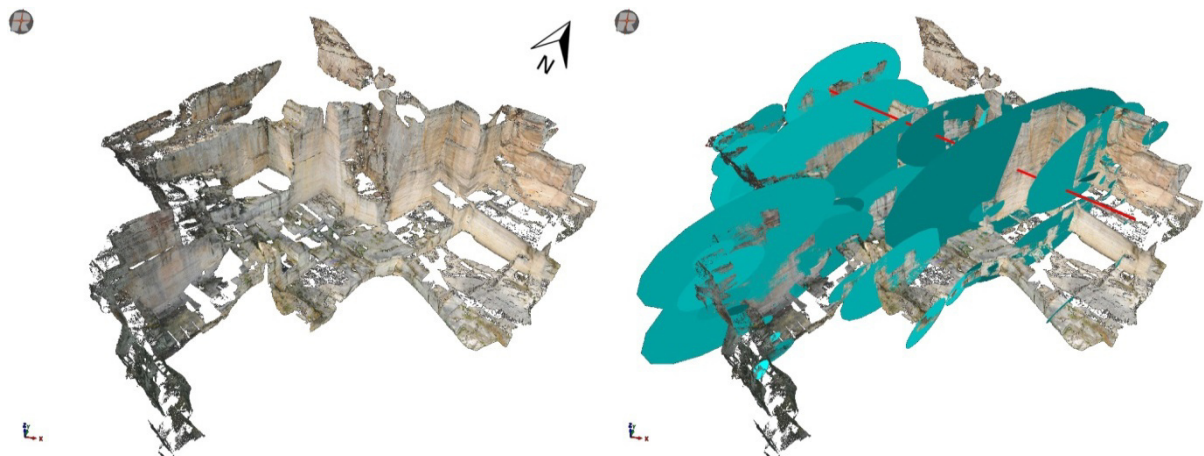


Abbildung 5.41 Links die Ausgangspunktwolke des Römersteinbruchs. Rechts konstruierte Ellipsen im Achsenverhältnis 2:1 für Kluftflächen der NW-SE Schar mit einer gewählten Scanline, die hier 7 Ellipsen schneidet.

### Ergebnisse

Die Ergebnisse des Intensitätsparameters  $P_{10}$  werden gemäß der Vorgehensweise (beschrieben in Kapitel 5.3.1) berechnet. Insgesamt werden 21 Scanlines mit unterschiedlichen Anfangs- und Endpunkten in der Punktwolke erstellt, davon 9 zur Bestimmung der Intensität der Kluftschar NW-SE und 12 für die Kluftschar NE-SW. Stete Beachtung erhält dabei die Einhaltung verschiedener Orientierungen der Scanlines, um eine Verzerrung der Ergebnisse zu minimieren (siehe Kapitel 7.2). Diese Scanlines erstrecken sich meist über die gesamte Ausdehnung des Steinbruchs und führen entlang der natürlich gegebenen Aufschlusswand. Der Schnittwinkel zwischen der zu untersuchenden Kluftfläche und der Scanline soll möglichst groß sein. Für jede Methode und jede Kluftschar werden ausnahmslos die gewählten 21 Scanlines verwendet.

Die detektierten Kluftflächen sind als Kreise und zusätzlich als Ellipsen dargestellt, um die Ergebnisse miteinander vergleichen zu können. Diese sind in Tabelle 5.18 aufgeführt. Zudem wird zwischen den zwei Methoden unterschieden, mit deren Hilfe die Flächen ursprünglich in der Punktwolke identifiziert werden. Die beiden Methoden sind der RANSAC Algorithmus (Methode 1) und die



Auswertung mithilfe der Software SplitFX (Methode 2). Die Methode wird nach dem dort berechneten Parameter als Länge (die Länge gleicht der im Kapitel 5.2.4 bestimmten Größe  $l_{\max}$ ) bezeichnet. Aufgrund schon einiger aufgeführter Probleme unterschätzt die Quantifizierung der Längen teilweise die wahre Flächenausdehnung. Kreise und Ellipsen, die auf der Grundlage der Längen gebildet werden, neigen dazu, die ursprüngliche Kluftfläche nicht vollständig zu umschließen sondern nur Teilbereiche abzudecken. Der aus den Längen berechnete Radius der geometrischen Formen Kreis und Ellipse wird daher auch in einer zweiten Berechnungsphase mit dem Faktor 1,5 multipliziert, um ein vollständiges Umschließen zu gewährleisten (Methode 3). Das Vergrößern führt logischerweise auch zu einer Erhöhung der Schnittpunkte mit der Scanline. Für die Ellipsen wird eine horizontale Ausrichtung gewählt (Abbildung 5.41).

Die Kluftschar NW-SE zeigt je nach gewählter Methode unterschiedliche Ergebnisse. Die erste Betrachtung gilt dem wichtigsten Parameter, der Intensität  $P_{10}$ . Die Ergebnisse variieren zwischen 0,25 bis zu 0,43 Klüften pro Meter (Tabelle 5.18). Eindeutig zeigt sich, dass die Intensität bei der Annäherung durch Ellipsen stets höher ist als bei der Annäherung durch Kreise. Dies zeigt sich auch deutlich in Abbildung 5.42. Dort sind sowohl die Abstände zwischen den Ellipsen, als auch die der Kreise der Schar NW-SE aufgeführt. Zwar sind die Abstände im niedrigen Bereich ungefähr gleich, aber ab 40% der Daten, bei ungefähr 1 m Abstand, wachsen die Abstände für die Kreise schneller an. Neben den höheren Werten für  $P_{10}$  ist auch die maximale Anzahl an Schnittpunkten auf den Flächen bei den Ellipsen höher. Das Verhältnis der Schnittpunkte von Ellipsen zu Kreisen liegt ungefähr zwischen 3:2 und 2:1.

Ähnliche Beobachtungen bestätigen sich bei der Kluftschar NE-SW. Dort schwanken die  $P_{10}$  Werte zwischen 0,19 und 0,44 und liegen damit im Bereich der Kluftschar NW-SE. Aus diesen Betrachtungen lässt sich zunächst schließen, dass sich die Kluftintensität beider Scharen ungefähr gleicht.

**Tabelle 5.18 Ergebnisse der Auswertung des Römersteinbruchs mithilfe beider vorgestellten Methoden für die Kluftscharen NW-SE (blau) und NE-SW (rot). Die Ergebnisse der Methode 2 (Längen aus SplitFX) wurden durch einen Faktor 1,5 angepasst, d. h. dass der zugrunde liegende Radius um das 1,5 fache verlängert wurde, um die Anzahl möglicher Schnittpunkte zu erhöhen (Methode 3).**

Methode	Geometrie	Schar	$P_{10}$	Abstand Max	Abstand Min	Anzahl Flächen
Methode 1	Kreis	NW-SE	0,25	20,93	0,02	39
	Ellipse	NW-SE	0,34	18,3	0,01	60
Methode 2	Kreis	NW-SE	0,26	22,53	0,08	17
	Ellipse	NW-SE	0,31	16,03	0,08	39
Methode 3	Kreis 1,5	NW-SE	0,30	16,03	0,08	51
	Ellipse 1,5	NW-SE	0,43	15,81	0,05	81
Methode 1	Kreis	NE-SW	0,38	12,9	0,01	49
	Ellipse	NE-SW	0,44	12,97	0,01	78
Methode 2	Kreis	NE-SW	0,19	23,57	0,15	35
	Ellipse	NE-SW	0,27	32,91	0,11	50
Methode 3	Kreis 1,5	NE-SW	0,24	14,38	0,03	57
	Ellipse 1,5	NE-SW	0,31	31,28	0,03	76

Ein Vergleich der 3 unterschiedlichen Methoden (RANSAC, Länge und Länge 1,5 fache) untereinander offenbart Unterschiede in den Ergebnissen. Die  $P_{10}$  Werte zeigen keinen eindeutigen Trend. Bei der Kluftschar NW-SE erreichen sie ihr Maximum für die Methode der 1,5 fachen Länge, bei der NE-SW Schar hingegen für die RANSAC Methode, unabhängig von der Tatsache, ob Kreise oder Ellipsen betrachtet werden. Gemein ist beiden Kluftscharen, dass die Methode der einfachen Längen die niedrigsten Intensitätswerte liefert.

Wichtig ist der Vergleich der Intensitätswerte unter Berücksichtigung der jeweiligen Methode. Dort offenbaren sich erst die wahren Unterschiede und Probleme. Nach der RANSAC Methode hat die Kluftschar NE-SW höhere Werte (0,25 zu 0,38 bzw. 0,34 zu 0,44). Bei der Methode der einfachen Längen bestätigt sich dieser Trend, allerdings sind die absoluten Werte unterschiedlich (0,26 zu 0,33 und 0,31 zu 0,38). Die erhöhten 1,5 fachen Längen weisen einen gegenläufigen Trend auf, hier hat die

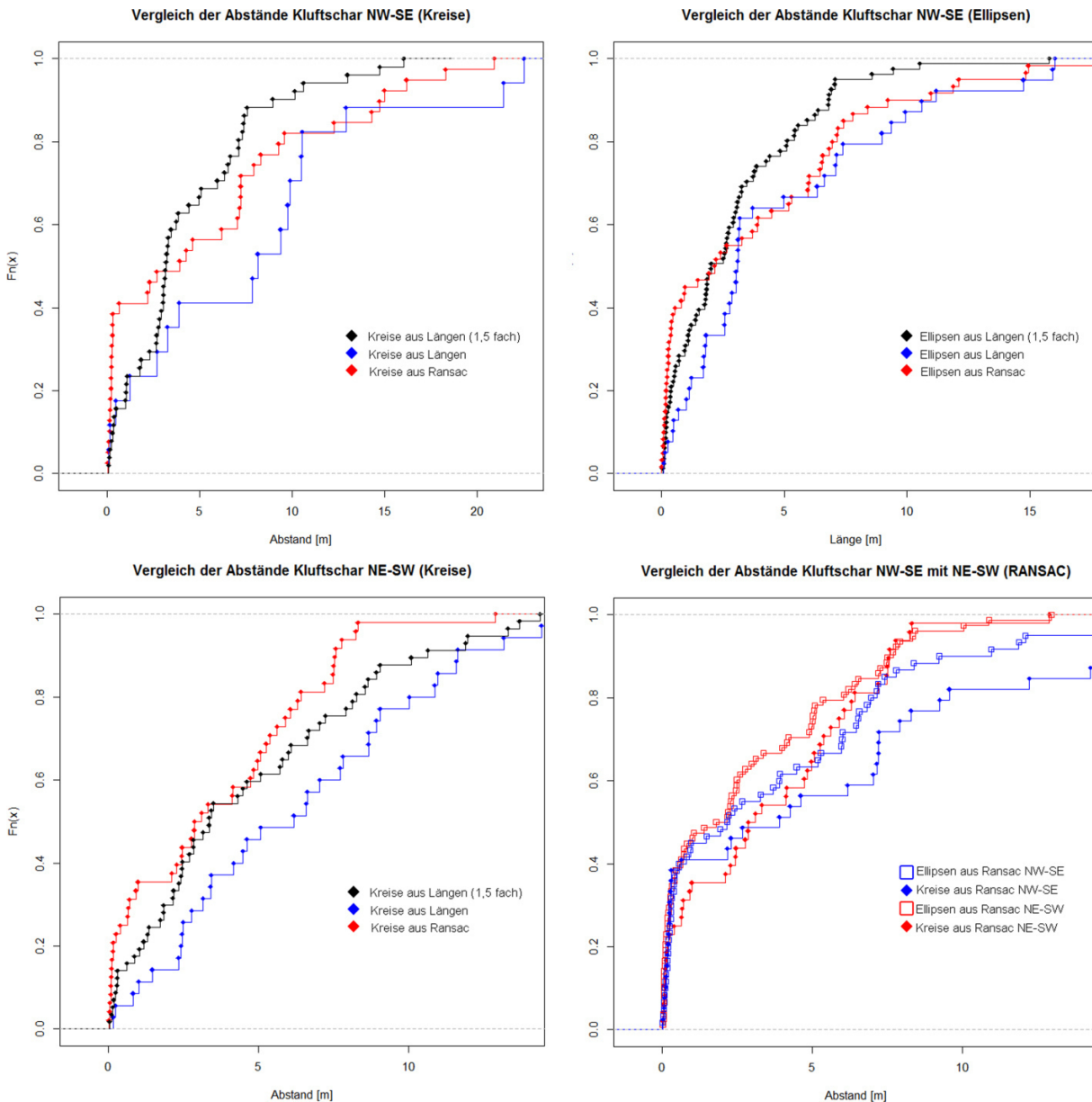


Kluftschar NW-SE den höheren Intensitätswert (0,30 zu 0,24 bzw. 0,43 zu 0,31). Die Ergebnisse sind also nicht eindeutig.

Bei der reinen Anzahl genutzter Flächen, die einen Schnittpunkt ausbilden, liegt Methode 2 weit zurück. Deutlich mehr Flächen sind über die Methoden 1 und 3 erreicht. Während die Anzahl berücksichtigter Flächen der Kluftschar NE-SW bei der Methode 1 (49 bzw. 78) und 3 (57 bzw. 76) ungefähr gleich ist, so unterscheidet sie sich doch deutlicher für die Kluftschar NW-SE.

In Abbildung 5.42 (links oben, rechts oben) werden die 3 Methoden - jeweils für Kreise und Ellipsen - in einem Diagramm der kumulativen Dichtefunktion untereinander verglichen. Bei beiden liegt das Minimum der Intensität bei Methode 2 und das Maximum bei Methode 3, wobei die Abstände der Methode 1 dazwischen liegen. Auffallend ist, dass gerade im Bereich niedriger Abstände die Methode 1 eine hohe Anzahl an Werten zeigt, ehe sich die Steigung den anderen beiden Kurven anpasst. Jeweils mehr als 40% der Werte liegen im Bereich von weniger als 1 m Kluftabstand. Abbildung 5.42 (unten links) zeigt die kumulative Dichteverteilung der Abstände der Kluftschar NE-SW und offenbart einen anderen Trend als die beiden zuvor betrachteten. Da die RANSAC-Auswertung und die Auswertung der 1,5 fachen Längen ungefähr die gleiche Anzahl an Schnittpunkten haben, können diese direkt miteinander verglichen werden. Bei der NE-SW Schar zeigt die RANSAC Methode deutlich niedrigere gemessene Abstände. Bei der NW-SE Schar ist es umgekehrt. So erklärt sich auch der gegenläufig festgestellte Trend der Intensitätswerte  $P_{10}$ .

Die zwei weiteren Parameter des minimalen und maximalen Abstands zeigen keine Korrelation zur gewählten Methode. Sie schwanken jedoch systemlos ziemlich stark. Auffallend ist der sehr niedrige Minimalabstand der RANSAC Methode. Dieser liegt bei 0,01 m. Eventuell deutet das wieder auf eine Dopplung bei der grundlegenden Flächenidentifikation hin. So könnten zu einer Kluftfläche der Punktwolke 2 Flächen erstellt worden sein, die sich nur minimal (um einen Abstand von 0,01 m) unterscheiden. Die Maximalabstände hängen grundsätzlich von der Größe der gewählten Kreise und Ellipsen ab. So ist der Maximalabstand der um das 1,5 fache erhöhten Längen niedriger als die der einfachen Länge, da tendenziell mehr Flächen von der Scanline durchstoßen werden.



**Abbildung 5.42** Oben: Vergleich der Abstände der Kluftchar NW-SE aus allen 3 vorgestellten Methoden (Kreise links, Ellipsen rechts), dargestellt in einer empirischen, kumulativen Dichtefunktion. Die Kluftintensität steigt hierbei proportional mit der Steigung der Kurven. Unten links: Vergleich der Abstände der Kluftchar NE-SW aus allen 3 vorgestellten Methoden. Unten rechts: Vergleich der Abstände der Ellipsen und Kreise aus der RANSAC Methode. Die Abstände der Ellipsen steigen steiler an und zeigen somit eine höhere Kluftintensität.

Als Vergleichsbasis sind auch manuell Kluftintensitäten bestimmt worden. Der  $P_{10}$  Wert der manuellen Aufnahme an Schar NW-SE beträgt 0,35 und an Schar NE-SW 0,32. Diese liegen für die Kluftchar NW-SE im Bereich der Ellipsen der Methode 1 und bei der Schar NE-SW im Bereich der Ellipsen der Methode 3.

Zusammenfassend lassen sich folgende Ergebnisse festhalten:

- Die Intensität ist durch die Wahl von Ellipsen höher als durch Kreise, da mehr Schnittpunkte entstehen können.
- Methode 1 überschätzt möglicherweise im Bereich niedriger Abstände die Anzahl an Messungen.
- Nach Methode 1 besitzt die Kluftchar NW-SE die höhere Intensität  $P_{10}$ , nach Methode 2 und 3 die NE-SW Schar.
- Die Ellipsenmessungen passen besser zu den manuell aufgenommenen Daten.

- Es ist unklar, ob Methode 1 oder Methode 3 besser geeignet ist, da Methode 1 näher am manuellen Wert der NW-SE Schar und Methode 3 näher am Wert der NE-SW Schar liegt.

Die Ergebnisse hängen natürlich stark von der Anzahl genutzter Scanlines ab und der daraus resultierenden Anzahl an Abstandsmessungen. Dies gilt sowohl für die manuellen Messungen als auch für die Analyse aus der Punktwolke heraus. Die ermittelten Werte können so kein finales Ergebnis darstellen, sondern sind einem gewissen Schwankungsbereich ausgesetzt. Bestätigt wird das auch durch die hohen Standardabweichungen (Tabelle 5.19). Auch die manuellen Messungen zeigen bei einem durchschnittlichen Kluftabstand von 2,84 m (NW-SE) bzw. 3,12 m (NE-SW) eine Standardabweichung von 1,96 m bzw. 2,24 m. Aufgrund der geringen Ausmaße des Aufschlusses ist eine Erhöhung der genommenen Messwerte kaum möglich, letztendlich spiegeln diese auch nur die hohe Variabilität der Abstände in dem Steinbruch wider.

**Tabelle 5.19 Durchschnittliche  $P_{10}$  Werte und deren Standardabweichungen für die Bemessung durch Ellipsen. Die Intensität  $P_{10}$  ist inklusive des 95% Konfidenzintervalls angegeben.**

Parameter	NW-SE			NE-SW		
	1	2	3	1	2	3
Mittlerer $P_{10}$ +	0,34 ±	0,31 ±	0,43 ±	0,44 ±	0,27 ±	0,31 ±
95% Konf.-Intervall	0,04	0,05	0,04	0,04	0,02	0,02
Standardabweichung	0,14	0,15	0,17	0,19	0,09	0,1
Anzahl Messungen	60	39	81	78	50	76

Die durch Scanlines untersuchte Intensität  $P_{10}$  ist stark abhängig von den Orientierungen der Scanline und der Trennflächenschar. Allgemein sollte der relative Winkel zwischen beiden Orientierungen größer als 30° (Gauthier und Bertotti 2012) sein und nach Terzaghi korrigiert werden (Terzaghi 1965). Die in Abbildung 5.41 dargestellte Scanline hat einen relativen Winkel von 30° zur Einfallrichtung der Trennfläche. Die Scanline wird unter Beibehaltung ihrer Länge in 10° Schritten um ihren Ursprung - von einer zur Kluftchar parallelen (0°) bis zu einer orthogonalen Stellung (90°) - rotiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.43 dargestellt und auch nach Terzaghi korrigiert. Die Resultate verdeutlichen die Abhängigkeit der Intensität  $P_{10}$  von der Orientierung der Scanline. Die Anzahl der Schnittpunkte steigt von einem orthogonalen Winkel bis ungefähr 40° an und geht dann gegen 0 bis zur Parallelität mit der Kluftfläche (da der Ursprung der Scanline direkt auf einer Kluftfläche liegt, sinkt die Anzahl der Schnittpunkte nicht auf 0). Durch die Korrektur nach Terzaghi ist dieser Trend weniger stark ausgebildet und die Intensität ist bis 40° ungefähr konstant. Auch dort fallen die Ergebnisse ab 30° stark ab und bestätigen somit auch die Aussagen nach (Gauthier und Bertotti 2012). Generell wird die höchste Intensität orthogonal zur Kluftfläche bei 90° erwartet, die Maxima liegen hier jedoch bei 50° bzw. 30°. Diese theoretische Überlegung hält nur bei einer ausreichend großen Anzahl an Klüften entlang der Scanline stand. Während der Rotation der Scanline werden unterschiedliche Ellipsen geschnitten, da ihre Ausdehnung begrenzt ist. Die Anzahl der Schnittpunkte (Kluftintensität  $P_{10}$ ) korreliert direkt mit der Orientierung der Scanline und der Größe und Anzahl der Ellipsen in Richtung der Scanline. Für eine statistisch relevante Aussage bezüglich dieser Beobachtungen sollte die Anzahl geschnittener Klüfte 225 übersteigen, nichtsdestotrotz hängt diese Zahl stark von der Beschaffenheit und Art des Kluftnetzwerks ab (Zeeb et al. 2013).

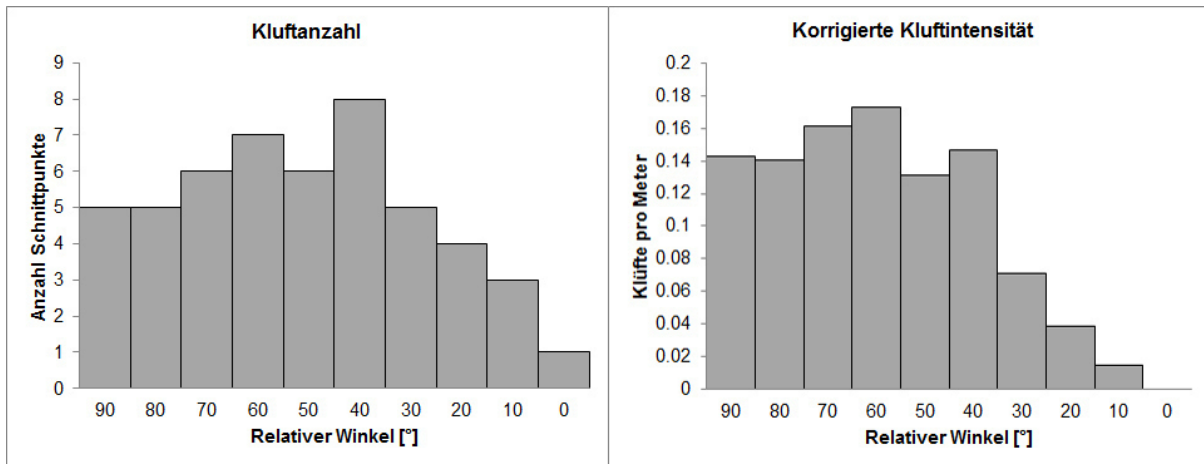


Abbildung 5.43 Anzahl der Schnittpunkte der konstruierten Ellipsen mit einer um ihren Ursprung rotierenden Scanline (links) und die korrigierten Intensitätswerte (nach Terzaghi) aus der Anzahl der Schnittpunkte (rechts).

### 5.3.4 Diskussion

Es wird erfolgreich ein Arbeitsprozess vorgestellt, der es ermöglicht die Scanlinemethode für Punktwolken zu adaptieren. Hierbei ist der Input durch einen Bearbeiter auf ein Minimum reduziert, so dass man von einer semi-automatischen Auswertemethode sprechen kann, die den Intensitätswert  $P_{10}$  liefert. Insgesamt bestehen 2 methodische Ansätze, die sich aber nur in der Identifizierung der Kluftflächen unterscheiden. Es ist wichtig eine hohe Anzahl an Scanlines zu konstruieren und in der Auswertung zu nutzen. Teilweise gibt es Ausreißer mit sehr hohen oder extrem niedrigen Intensitätswerten. Die hohe Anzahl an Scanlines schwächt den Einfluss dieser Ausreißer. Zu niedrige Werte können oft entstehen, wenn die Scanline falsch gesetzt wurde und diese nicht entlang der Aufschlusswand sondern „frei im Raum“ verläuft, beispielsweise von einer Seite eines Steinbruches hinüber auf eine gegenüberliegende Wand. Das schafft einen unnatürlich hohen Kluftabstand bei der Messung. Es bietet sich auch an extreme Ausreißer in einer Vorauswahl zu eliminieren. Die Anzahl der Scanlines muss den Aufschlussgegebenheiten entsprechen. Eine 20 m<sup>2</sup> große Wand kann nicht durch dutzende Scanlines durchzogen werden. Ferner sollte sich die Orientierung der Scanline nicht nur der Aufschlusswand sondern auch der Orientierung der zu untersuchenden Kluftchar anpassen. Ein möglichst hoher Winkel ( $> 30^\circ$ ) zwischen diesen beiden Orientierung ist wünschenswert (siehe auch Gauthier und Bertotti 2012), da sonst die Korrektur nach Terzaghi fehlerhaft sein kann.

Die in Kapitel 5.3.3 aufgeführten Ergebnisse sind nicht eindeutig. Sowohl die manuellen Kontrollmessungen als auch die Messungen über die 3 entwickelten Methoden sind stark abhängig von der Anzahl an verwendeten Scanlines. Aufgrund der geringen Größe des Aufschlusses ist aber eine Konstruktion weiterer Scanlines schwierig. Unter Berücksichtigung der hohen Standardabweichungen kann davon ausgegangen werden, dass die Kluftintensität beider untersuchten Scharen gleich ist.

Als schwieriger erweist sich die Frage, welche Methode bei der zukünftigen Auswertung der Intensität empfohlen wird. Der Arbeitsaufwand ist bei allen 3 Methoden gleich hoch. Die Exaktheit der Ergebnisse ist in erster Linie von der Genauigkeit der Kluftidentifizierung als Flächen abhängig. Beide Methoden haben Schwächen, so offenbart der RANSAC Algorithmus eine Dopplung von Flächen durch eine fehlerhafte Flächenerkennung. Der Algorithmus tendiert dazu zusammenhängende Flächenareale in zwei Flächen aufzuspalten, wenn die Fläche eine hohe Rauigkeit bzw. viele Unregelmäßigkeiten aufweist. So wird auf künstliche Weise ein zu hoher Intensitätswert geschaffen, da der Abstand zwischen 2 solchen Flächen extrem gering ist. Dies zeigt sich explizit in den vorgenommenen Abstandsmessungen (Abbildung 5.42) durch eine tendenziell (verglichen mit den anderen beiden Methoden) hohe Anzahl geringer Abstände im Bereich des fast senkrechten Anstiegs der Kurve der kumulativen Dichtefunktion knapp über 0 m. Auch der SplitFX Algorithmus neigt dazu zusammenhängende Flächen in einzelne Flächen zu unterteilen, zudem unterschätzt er die reale Größe der sichtbaren Flächen. Dadurch kann es zur Konstruktion kleiner Ellipsen oder Kreise kommen, was sich negativ auf den Intensitätswert auswirkt. Dem wird durch die Erhöhung des gemessenen Radius um den Faktor 1,5 entgegengewirkt. Eine Empfehlung kann nur insofern gegeben

werden, als dass durch den Bearbeiter entschieden werden muss, ob einer der beiden Algorithmen zufriedenstellend gearbeitet hat.

Alle Ergebnisse zeigen hohe Standardabweichungen (Tabelle 5.19). Das ist zum einen problematisch bei der eindeutigen Bestimmung eines  $P_{10}$  Wertes für eine entsprechende Schar, aber auch bei der Integration dieser Scharen in ein Discrete-Fracture-Network Modell. Natürlich sind diese Modelle statistischer Natur, jedoch kann der Intensitätswert  $P_{10}$  nicht ohne weiteres als Eingabeparameter genutzt werden. Zunächst steht eine Umrechnung in einen  $P_{32}$  Wert an. Spätestens bei dieser Umrechnung geht die ermittelte Standardabweichung unter. Auch gibt es keine Möglichkeit, die Streuung der Werte einzugeben. Es muss also stets ein eindeutiger  $P_{10}$  Wert gefunden werden, auf dessen Grundlage das DFN Modell aufbauen kann.

Nach Rohbaugh Jr. (Rohbaugh Jr et al. 2002) ist zukünftig eine Adaption eines „Window-Mappings“ oder besser noch eines „Circular Window Mappings“ wünschenswert. Diese Methode garantiert genauere Ergebnisse. Allerdings erweist sich eine automatisierte Methodenentwicklung in Bezug auf diese Art des Mappings als schwierig und ist nicht mehr Bestandteil dieser Dissertation.

### 5.3.5 Visualisierung der Kluftintensität

Die Intensität der Klüftung kann nicht nur mathematisch berechnet, sondern auch direkt visuell in der Punktwolke dargestellt werden. So ist es gelegentlich sinnvoll, direkt einsehen zu können, in welchen Bereichen die Intensität hoch oder niedrig ist, da lokale Veränderungen viel schneller wahrgenommen werden. Ein Intensitätswert, der für einen Aufschluss angegeben wird, ist statisch und spiegelt diese Veränderungen nicht wieder.

Um einer Visualisierung der Intensität nachzukommen, wird eine Art inverse Distanzwichtung als Interpolationsverfahren verwendet. Diese Überlegung basiert darauf, jedem Punkt der Punktwolke einen eigenen „Intensitätswert“ zuzuordnen. Dieser Intensitätswert setzt sich aus der Entfernung des Punktes zu umliegenden Klüften zusammen. Je mehr Klüfte innerhalb eines Radius  $g$  liegen, desto höher ist der dem Punkt zugeordnete Intensitätswert. Alle so ermittelten Werte werden in eine Intensitätsfarbskala übertragen (beispielsweise von violett als niedrigsten bis rot als höchsten Wert). So entsteht eine RGB Farbwolke der Intensität.

Zwei unterschiedliche Methoden werden im Folgenden untersucht. Die erste Methode basiert auf einem manuellen Ansatz der Kluftdetektion. Hier werden die sichtbaren Kluftspuren im Aufschluss durch Polylinien dargestellt (zuzüglich der Schnittkanten zweier Kluftflächen). Diese Polylinien bestehen selbst aus mehreren Punkten, die über x-, y- und z-Koordinaten beschrieben sind. Die zweite Methode beruht auf den identifizierten Kluftflächen (siehe beispielsweise Kapitel 5.2.3). Jede dieser Kluftflächen wird über ihren Mittelpunkt definiert. Bei beiden Methoden werden nun die Abstände aller Punkte im Aufschluss zu den Punkten der Polyline bzw. der Mittelpunkte über die euklidische Distanz berechnet:

$$d(PW, P_L) = \|PW - P_L\|_2 \quad d, PW, P_L \in R^3 \quad 5.41$$

Mit der Distanz  $d$  zwischen Punkten der Punktwolke  $PW$  und Punkten der Polyline oder Mittelpunkte  $P_L$ . Anschließend kann die Anzahl der Punkte  $P_L$  um einen Punkt  $PW$  innerhalb eines Grenzradius  $g$  bestimmt werden. Die Anzahl der Punkte gilt als Äquivalent und Quantifizierung des Intensitätswerts. Der Radius  $g$  kann frei gewählt werden. Um den *Edge*-Effekt, einer Abnahme der Intensität hin zum Rand der Punktwolke, abzuschwächen, wird der Intensitätswert über die Anzahl aller Punkte  $P_L$  innerhalb des Radius  $g$  normiert (Pearce et al. 2011). Die Reichweite an Intensitätswerten wird in Klassen unterteilt, im Rahmen dieser Arbeit in insgesamt 18. Jeder Klasse wird ein Farbwert über einen RGB Code zugeordnet von Rot als Maximalwert bis Grün als Minimalwert. Durch einen Reimport der RGB Informationen und den zugehörigen x-, y-, z-Koordinaten ist die Punktwolke in Bezug auf die Kluftintensität fertig koloriert.

Ergebnisse dieser Visualisierung sind in Abbildung 5.44 dargestellt. Die Abbildungen unter a und b werden auf Grundlage der Kluftspuren erstellt. Dort sind die Intensitätswerte in 18 RGB Klassen unterteilt. Gut sichtbar ist dort (b) der *Edge*-Effekt, da die Ergebnisse nicht normiert wurden. Unter c, d und e wird die Kolorierung der Intensität basierend auf den Mittelpunkten erkannter Flächen durchgeführt (siehe auch Abbildung 5.39).



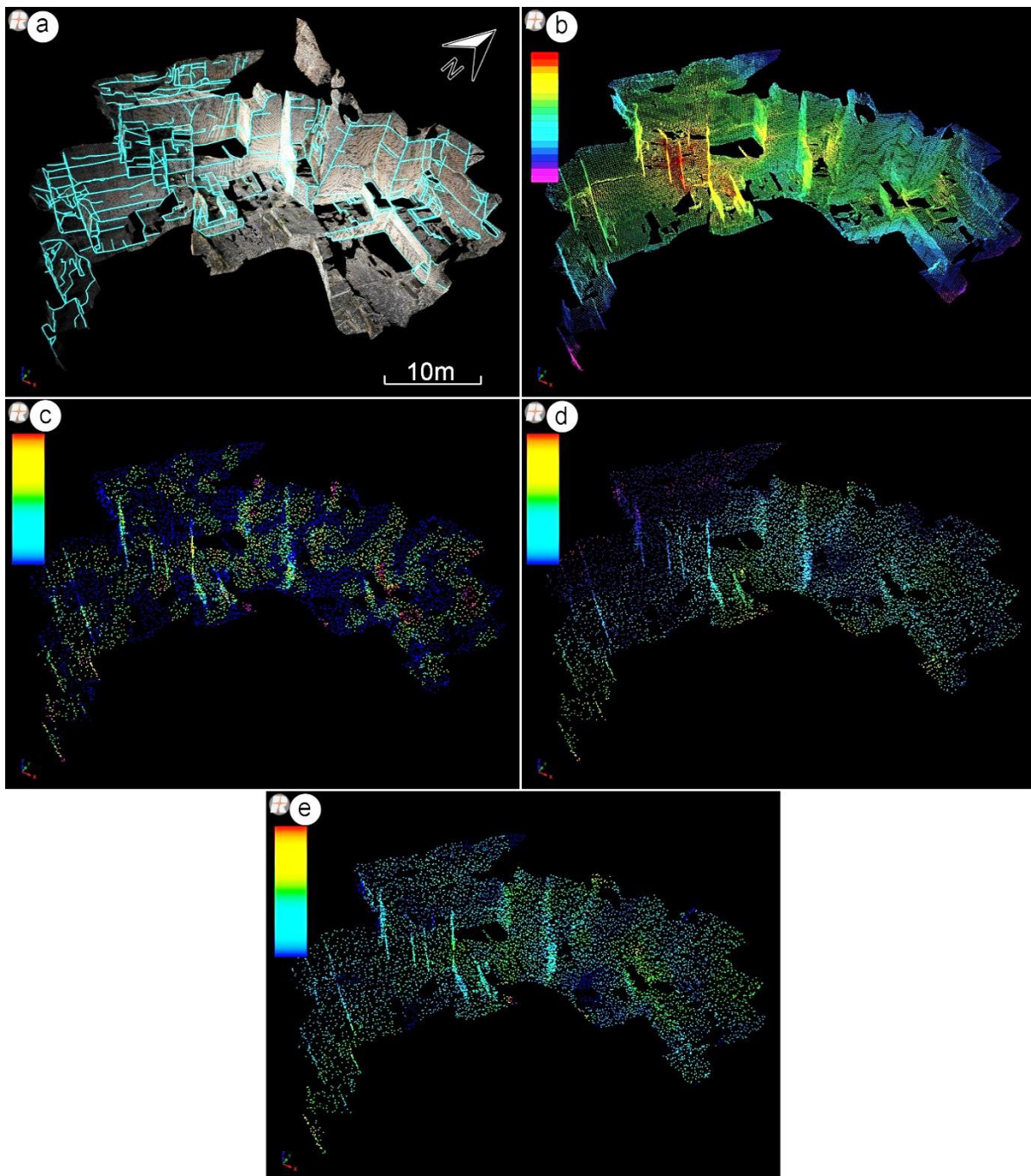


Abbildung 5.44 Visualisierung der Kluftintensitäten des Römersteinbruchs. a – Im Römersteinbruch manuell identifizierte Kluftspuren und Kanten. b – Kolorierung der Intensität auf Grundlage der Kluftspuren aus a. Die Ergebnisse sind noch nicht vom sogenannten „Edge-Effekt“ befreit. Eine deutliche Häufung ist innerhalb des Steinbruchs zu erkennen (Mitte links). c – Kolorierung der Intensität auf Grundlage der Mittelpunkte der erkannten Flächen. Ein Grenzradius  $g$  von 2,5 m wird hier angewendet. Markant erkennbar sind viele blaue Bereiche, in denen die Intensität nahezu null ist. d – Eine Erhöhung des Grenzradius führt auch zu einer Reduzierung der blauen Bereiche ohne oder mit geringer Intensität. e – Ein hoher Radius  $g$  von 10 m führt zu einem sehr harmonischen Bild der Intensität und einige Bereiche mit hoher Intensität stechen heraus. Für die Bilder in c, d und e wird nicht, wie in Bild b, die Einteilung in 18 Farbklassen verwendet, sondern es werden die berechneten Intensitätswerte direkt über die Software koloriert.

Die Punktdichte ist niedriger als unter b, da die Rechenkapazität begrenzt ist. Zunächst wird deutlich, dass kein Edge-Effekt auftritt, da alle Daten normiert sind. Statt der 18 RGB Klassen werden hier die Intensitäten direkt über die Software von blau (niedrige Intensität) nach rot (hohe Intensität) eingefärbt. Unter c wird ein Suchradius  $g$  von 2,5 m genutzt. Dort sind einige Bereiche in blau zu erkennen, für die kein Mittelpunkt in Reichweite liegt oder nur eine sehr geringe Anzahl, so dass auch die Intensität gegen 0 geht. Um diesem Effekt entgegenzuwirken, wird der Radius  $g$  auf 5 m (d) und

10 m (e) erhöht. Der Effekt ist somit abgeschwächt und die Intensitätsverteilung besser sichtbar. Während unter d noch relativ starke Abstufungen in der Intensität zu sehen sind (Bereich oben links im Vergleich zur Mitte rechts), homogenisiert sich die Intensität mit zunehmendem Radius  $g$ . Der Wert von  $g = 5\text{ m}$  erweist sich für die Betrachtung dieser Aufschlussgröße als ideal, um weder Bereiche ohne Wert wie unter c noch eine zu starke Homogenisierung wie unter e abzubilden.

Diese Ergebnisse sind keine Darstellung der Kluftintensität  $P_{10}$ . Das Resultat ähnelt eher dem  $P_{20}$  Wert, der Anzahl an Klüften innerhalb einer Fläche bzw. dem  $P_{30}$ , und gibt in etwa die Anzahl an Klüften im Raum an. Jedem Punkt in dem Modell wird eindeutig ein Intensitätswert zugeordnet, dennoch sind die Ergebnisse qualitativer Natur und dienen nicht direkt zur Feststellung eines Ergebniswertes zur Intensität. Das Hauptaugenmerk liegt hier auf der Visualisierung möglicher Bereiche extrem hoher oder niedriger Kluftintensitäten und lokalen Veränderungen entlang der Aufschlusswand. So können beispielsweise Kluftkorridore in einem Aufschluss deutlich hervorgehoben werden.



## 6 DFN Modellierung

In Kapitel 5 wird detailliert eine Methodik zur Gewinnung unterschiedlicher Trennflächenparameter erläutert. Im nun folgenden Kapitel wird eine Anwendungsmöglichkeit dieser Parameter in Form einer Modellierung dargestellt.

Im Detail wird eine Methode präsentiert, mit der hydraulische Eigenschaften geklüfteter Reservoirs modelliert werden können. Die Beschreibung des Verhaltens von Fluiden in Reservoirs während der Produktionsphase ist eine Kernherausforderung von Geowissenschaftlern und Reservoiringenieuren. Dazu wird die Methode der Discrete Fracture Network (DFN) Modelle angewendet, ein vielversprechender Ansatz, der neben dem Matrixgestein des Reservoirs vor allem alle hydraulisch aktiven Trennflächen (Klüfte) berücksichtigt. Modelliert werden sogenannte Reservoiranaloge. Dabei handelt es sich sowohl um oberirdische Aufschlüsse (beispielsweise Steilküsten oder Steinbrüche) als auch um unterirdische Aufschlüsse (wie Stollen alter Minen oder Tunnel). Die dort aufgeschlossenen Gesteinseinheiten müssen zur gleichen tektonostratigraphischen Einheit wie das zugehörige Reservoir dieses Analoges in der Tiefe gehören.

Verschiedene Kluftparameter werden bestimmt, um ein DFN Modell zu erstellen. Diese werden aus den Aufschlüssen mithilfe der Punktwolken des terrestrischen Laserscanners gewonnen, wie in Kapitel 5 eingehend erläutert. Zu diesen geometrischen Parametern gehört die Raumlage und Größe der Kluft sowie die Intensität der Klüftung. Der TLS Datensatz stellt eine Erweiterung herkömmlicher Datenerhebungen aus Seismik oder Bohrungen dar.

Neben der hydraulischen Modellierung (Kapitel 6.6.3) werden in dem Kapitel anhand des Beispielaufschlusses Eberstadt (Kapitel 4.1.3) noch weitere Anwendungen der DFN Modelle aufgeführt, eine geomechanische Aufskalierung von Trennflächenparametern (6.6.5), eine Stabilitätsanalyse (6.6.6), und die Berechnung von Blockgrößen (6.6.7). Zunächst werden die grundlegenden Reservoirtypen und Modellierungsansätze aufgezeigt und die theoretischen Grundlagen der DFN Modelle erläutert (Kapitel 6.1 bis 6.5).

### 6.1 Reservoirtypen

Geologische Reservoirs sind Gesteinsformationen im Untergrund, in denen durch Bohrungen gewinnbare Kohlenwasserstoffe und andere Fluide gespeichert sind. Abhängig vom Reservoirtyp befinden sich die Fluide im Matrixgestein, in Klüften oder meist in beiden genannten Medien. Der Reservoirtyp wird über die Beschaffenheit des Reservoirs bestimmt. Hierbei ist es wichtig zu unterscheiden, wie hoch der Anteil der durch Matrix und Klüfte induzierten Porosität und Permeabilität ist. In Abbildung 6.1 sind die Reservoirtypen dargestellt. Insgesamt werden 6 Reservoirtypen unterschieden, dazu zählen nach Nelson (Nelson 2001) und Bratton (Bratton et al. 2006):

- **Typ 1:** Klüfte dominieren bei diesem Typ und sorgen maßgeblich für Porosität und Permeabilität.
- **Typ 2:** Hauptanteil durch Klüfte, niedrige Porosität und Permeabilität durch die Matrix.
- **Typ 3:** Reservoirs mit hoher Porosität, Produktion eventuell ohne Klüfte möglich, diese liefern aber zusätzliche Permeabilität.
- **Typ 4:** Klüfte liefern keinen signifikanten Beitrag zu Porosität und Permeabilität, sie können sogar als Barrieren auftreten.
- **Typ M:** Hohe Matrixporosität und -permeabilität, offene Klüfte erhöhen Permeabilität, geschlossene Klüfte fungieren als Barrieren.
- **Typ G:** Wie Typ 2, eingeführt für unkonventionelle Gasreservoirs (wie Coal-Bed-Methane).

Reservoirs des Typs M können relativ einfach modelliert werden, indem man das Gestein im Reservoirmodell als isotropen Körper mit homogenem Fluidfluss annimmt. Dementsprechend können auch Permeabilität und Porosität als konstant abgeschätzt werden. Häufig findet man aber natürliche, geklüftete Reservoirs („Naturally Fractured Reservoirs, „NFR“) im Untergrund vor. Die Darstellung dieser Reservoirs im Modell wird durch das Kluftnetzwerk erschwert. Häufig handelt es sich dabei um Reservoirs des Typs 1 oder 2, bei denen der Einfluss der Klüfte auf Porosität und Permeabilität sehr hoch ist. Die Modellierung dieser Reservoirtypen erfordert eine komplexere Herangehensweise.

Reservoirs des Typs 1 oder 2, bei denen der Einfluss der Klüfte auf Porosität und Permeabilität sehr hoch ist. Die Modellierung dieser Reservoirtypen erfordert eine komplexere Herangehensweise.

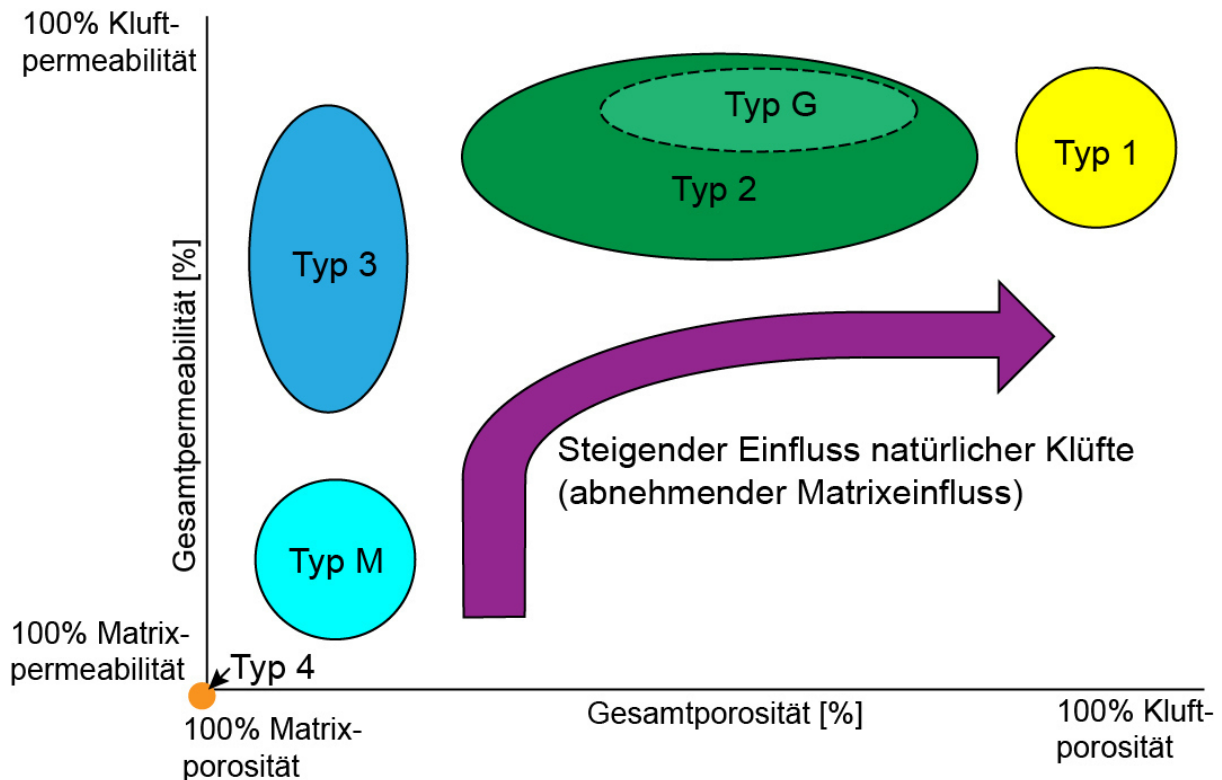
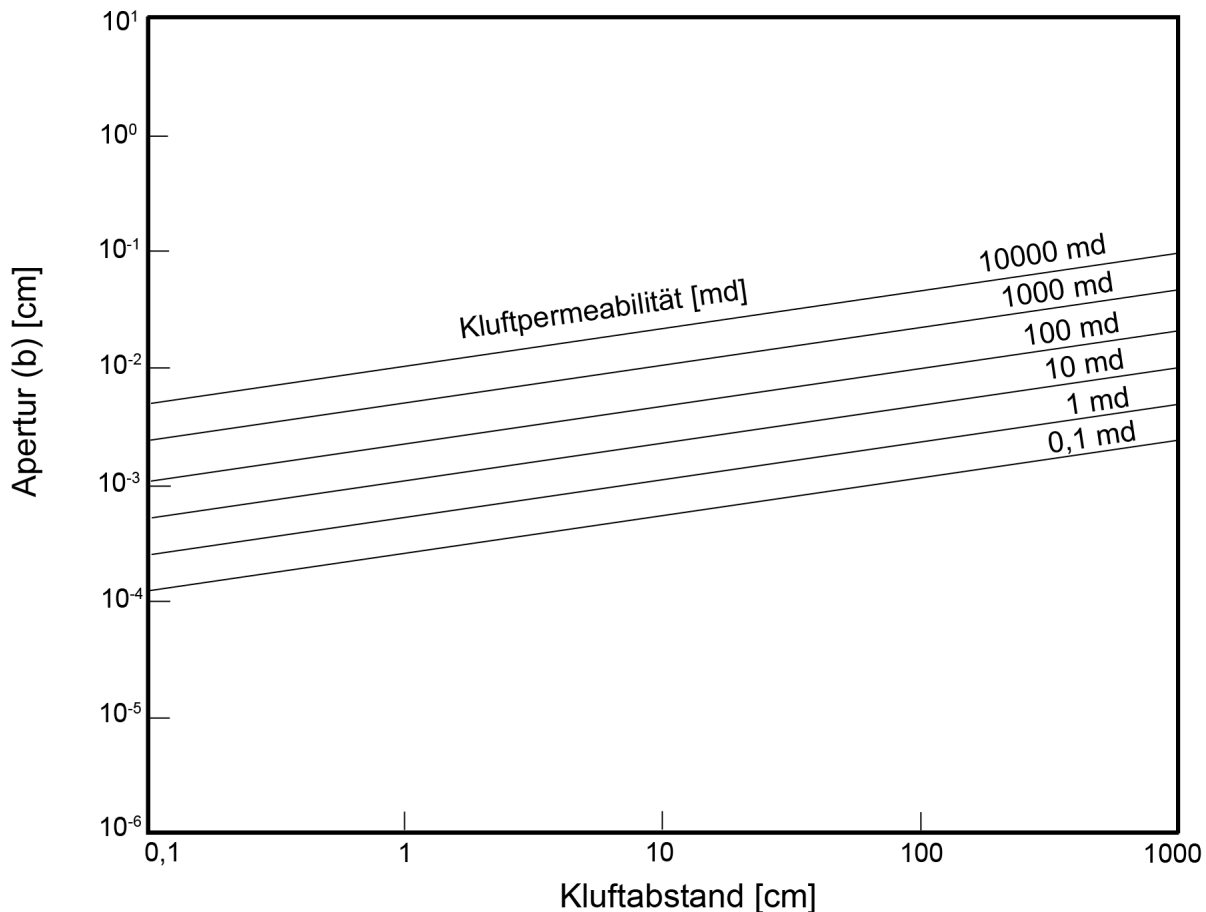


Abbildung 6.1 Klassifizierung von Gesteinsformationen anhand ihres Anteils an Kluft- und Matrixporosität sowie Kluft- und Matrixpermeabilität in Reservoirtypen (verändert nach Nelson 2001; Bratton et al. 2006).

## 6.2 Geklüftete Reservoirs

Geklüftete Reservoirs eignen sich als Ausgangsobjekt für die Erstellung von DFN Modellen. Wichtige petrophysikalische Eigenschaften von Klüften in Reservoirs sind ihre Permeabilität, Porosität, Fluidsättigung innerhalb der Klüfte und der Recovery Faktor des Kluftsystems. Permeabilität und Porosität von Klüften werden stark durch die Oberflächenbeschaffenheit (Morphologie) der Klüfte bestimmt. Hier unterscheidet man offene Klüfte, deformierte Klüfte, zementierte Klüfte und Hohlraumklüfte (*vuggy fractures*). Die Art bestimmt die Höhe der Permeabilität (sehr hoch bei offenen Klüften) und ihre Anisotropie (hoch bei deformierten Klüften) (Nelson 2001).

Den Haupteinfluss auf die Permeabilität des Reservoirs durch das Kluftsystem hat sicherlich die Apertur. Neben der Apertur spielt aber auch der Kluftabstand bzw. die Kluftintensität eine gewichtige Rolle bei der Kluftpermeabilität und -porosität (Nelson 2001). Abbildung 6.2 zeigt den Einfluss von Apertur und Kluftabstand auf die Kluftpermeabilität. Zwischen den einzelnen Parametern besteht ein direkter Zusammenhang (Abbildung 6.2). So ist die resultierende Permeabilität in einem Reservoir eine Funktion des Kluftabstands und der Apertur. Eine Erhöhung dieser letztgenannten Werte führt proportional zu einer Erhöhung der Kluftpermeabilität.



**Abbildung 6.2** Zusammenhang von Apertur, Kluftabstand und Kluftpermeabilität in einem NFR („Natural Fractured Reservoir“). Eine Erhöhung der Apertur und eine Minderung der Kluftabstände führen zu erhöhter Permeabilität (verändert nach Nelson 2001).

Natürlich geklüftete Reservoirs setzen sich aus einem Kluftnetzwerk und der Gesteinsmatrix zusammen. Das Kluftnetzwerk ist zufällig im Raum verteilt und durchschneidet die Matrix. Die Charakterisierung solcher Reservoirs beinhaltet die Untersuchung dynamischer und statischer Parameter (Bahrami et al. 2012). Zu den dynamischen zählt beispielsweise die Permeabilität einzelner Klüfte, zu den statischen Parametern die Apertur, Porosität, Intensität, Orientierung und Größe. Die 3 zuletzt erwähnten, kluftbeschreibenden Parameter können mithilfe von terrestrischem Laserscanning quantifiziert werden. Während Bohrkerne und Bohrlochuntersuchungen nur begrenzte Informationen über den Kluftabstand liefern, zeigen Minen und Oberflächenaufschlüsse im großen Maßstab Variationen und eine Verteilung der Klüfte im Raum. Durch Analyse dieser Aufschlüsse können lokale Veränderungen im Kluftnetzwerk genauer wiedergegeben und somit Variationen der Permeabilität detektiert werden.

### 6.3 Reservoirmodellierung

Die Reservoirmodellierung ist immer noch eine der größten Herausforderungen für Geologen und Reservoiringenieure. Das Verstehen des Verhaltens verschiedener Fluide wie Kohlenwasserstoffe oder Wasser in einem Reservoir ist der Schlüssel zur Beschreibung der Reaktion des Reservoirs während der Produktionsphase. In den vergangenen Dekaden wurden verschiedene Ansätze zur Darstellung des Verhaltens, genauer des Durchflussverhaltens, der Fluide durch Matrix und Klüfte der Gesteine entwickelt (Bigi et al. 2013, Bisdorn et al. 2014, Cacas et al. 2001, Bratton et al. 2006, Decker 2007, Dershowitz und La Pointe 2007, Dershowitz et al. 2004, Dershowitz et al. 1998, Gauthier und Bertotti 2012, Gong 2007, Lee und Farmer 1993, Painter 2011, Wilson et al. 2011, Warren und Root 1963). Gerade die Anwesenheit von Klüften erschwert die Voraussage über das Verhalten während der Produktion. Im Folgenden sind 2 Ansätze zur Lösung dieser Probleme vorgestellt.

### 6.3.1 Äquivalente Kontinuums Modelle

Um den Fluidfluss durch ein Kluftnetzwerk vorherzusagen werden 2 Ansätze favorisiert, Discrete-Fracture-Network-Modelle (DFN) und die Äquivalenten-Kontinuum-Modelle bzw. EPM Modelle („equivalent porous medium“ oder auch stochastic continuum model) (Gong 2007). Dual-Porosity-Modelle zählt man allgemein zu den EPM Modellen. Darunter fallen auch „Single-Continuum-Modelle“. Bei „Single-Continuum-Modellen“ wird für eine Gesteinsschicht oder ein Reservoir repräsentativ ein gemittelter Wert gewählt (für Permeabilität, Porosität etc.).

Bereits im Jahre 1963 entwickelten Warren und Root (Warren und Root 1963) einen entsprechenden Ansatz zur Beschreibung von Porosität und Permeabilität geklüfteter Reservoirs durch ein Dual-Porosity-Modell. Ihr Ansatz basiert auf der Annahme, dass die Matrix zwar über das Porenvolumen die Porosität des gesamten Reservoirs erheblich erhöht, aber nur wenig zur Permeabilität beiträgt. So kann ein Reservoir als Typ 1 (Abbildung 6.1) klassifiziert werden. Die sekundäre Porosität der Klüfte erhöht hingegen erheblich die Permeabilität dieses Reservoirs. Beide Bereiche, Klüfte und Matrix, werden in diesem Ansatz getrennt betrachtet. Es wird sowohl der Fluidfluss der Klüfte als auch der Austausch zwischen den Klüften und der Matrix berechnet, jeglicher Fluidfluss innerhalb der Matrix wird jedoch vernachlässigt.

Die Trennung beider Bereiche und die separate Berechnung fasst man allgemein unter dem Begriff des „Dual-Porosity-Modells“ zusammen, in dem Matrix und Klüfte getrennt und vereinfacht dargestellt werden. Die Matrix wird als isotrop und homogen angenommen und repräsentativ als Parallelepipeds angenähert, die Klüfte hingegen als orthogonales Netzwerk kontinuierlicher und einheitlicher Kluftflächen (Warren und Root 1963) (Abbildung 6.3). Die Eigenschaften der Matrix wie Porosität oder Permeabilität werden über das arithmetische oder geometrische Mittel bestimmt. Für den Matrix-Kluft-Austausch wird ein Sigma-Faktor (siehe Kapitel 6.5.2) bestimmt, für die Permeabilität werden mathematische Gleichungen, die auf einem Ansatz der innerhalb der Klüfte aufgebauten Druckunterschiede beruhen, festgelegt. Die letztgenannten werden durch den Interporositätsflusskoeffizienten  $\lambda$  und den Speicherkoeffizienten der Matrix und der Klüfte  $\omega$  bestimmt (siehe Kapitel 6.4.3). Bei ausgereifteren EPM Modellen wird ein Raster über den Bereich des Reservoirs gelegt und für jede einzelne Zelle des Rasters repräsentativ ein Wert gemittelt.

### 6.3.2 Discrete Fracture Network Modelle

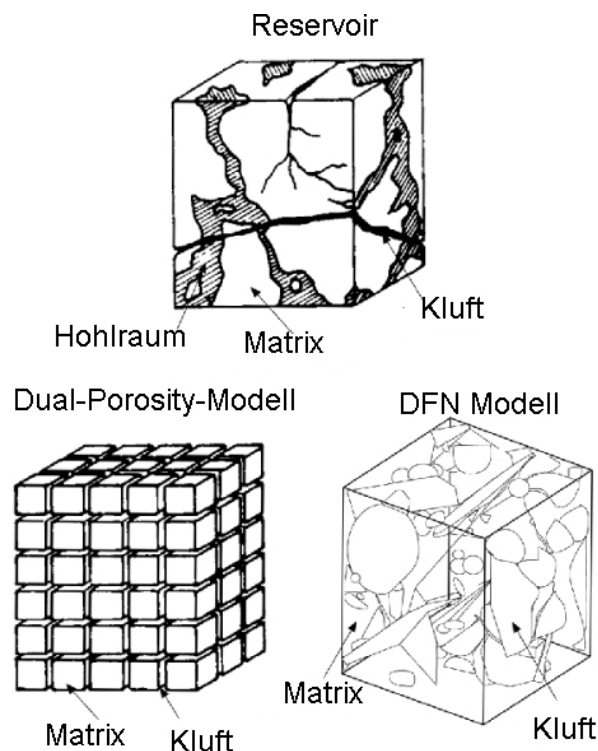
Die Schwachstelle der Dual-Porosity-Modelle ist die Simplifizierung des Kluftnetzwerks. Denn die Menge der zu produzierenden Kohlenwasserstoffe oder des Wassers ist eine Funktion der Konnektivität und Geometrie des Kluftnetzwerks (La Pointe et al. 1997). Einzelne Bereiche können nur schwach mit den Klüften durchzogen sein und so eine geringe Konnektivität aufweisen oder komplett in ihrem Kluftnetzwerk abgetrennt sein. Die Abtrennung einzelner Zellen bezeichnet man als Reservoir-Kompartimentierung („reservoir compartmentalization“) (Ortoleva 1994).

Discrete Fracture Network Modelle bilden die Geometrie der Kluftnetzwerke nach statistischen und deterministischen Vorgaben ab (General et al. 2013). In jeder Kluft wird separat der Fluidfluss nach Darcy's Gesetz berechnet (Gong 2007) (siehe auch Kapitel 6.5.1). Sie helfen dadurch nicht nur, die Kompartimentierung abzubilden, sondern zeigen auch Bereiche unterschiedlichen Fluidflusses im Raum. Statt der Kluftgeometrie simplifizieren DFN Modelle die Physik des Fluidflusses, zeigen aber für geklüftete Reservoirs, z.B. vom Typ 1, bessere Ergebnisse (La Pointe et al. 1997).

DFN Modelle werden angewendet, um aus bestehenden Daten über „Fractured-Reservoirs“, also geklüftete Reservoirs, ein verifiziertes statisches Modell zu erstellen, das das dynamische Verhalten eines Reservoirs beschreibt. Auf diese Weise können intelligente Entscheidungen über die Reservoirentwicklung getroffen werden; zudem lassen sich so auch aussagekräftige Ingenieurwerte für Simulatoren auf Rasterebene erhalten (Gong 2007, General et al. 2013). „Discrete Fracture“ steht hierbei für eine hydraulisch aktive Klüfte, da nur diese für die Modelle berücksichtigt werden. Der Arbeitsprozess besteht aus der Erstellung eines konzeptionellen Kluftmodells, der Erstellung, des Tests und dem Readjustieren von Hypothesen, um ein validiertes Modell zur Simulation (Fluiddurchflusssimulationen etc.) zu erlangen. Solche Modelle sind stark maßstabsabhängig und mit Vergrößern des zu betrachtenden Maßstabs steigt auch die Anzahl anzuwendender Generalisierungen. Große Strukturen, wie sie in der Seismik oder durch geologische Kartierung, wie Störungen, Großklüfte etc., erkannt werden können, lassen sich direkt als deterministischer Eingabeparameter in

das Modell einbauen. Sie haben generell einen großen Einfluss auf das Fließverhalten eines Reservoirs und ihre Durchlässigkeit wird deterministisch bestimmt und in das Modell eingepflegt, um festzulegen, ob sie als Fluidbarriere anzusehen sind oder sie den Fluidfluss massiv vergrößern. Kleine und mittlere Strukturen können jedoch nicht deterministisch in das Modell implementiert werden. Das liegt darin begründet, dass ihre Aufnahme nicht explizit für jede einzelne Struktur erfolgen kann. Stattdessen wird ihre jeweilige zugrunde liegende statistische Verteilung ermittelt und diese Strukturen stochastisch in das Modell übertragen, da auch ihre Beprobung nur eine zufällige Probe der wahren Verteilung darstellt (La Pointe et al. 1997).

DFN Modelle werden dem Fakt gerecht, dass auf jeder Maßstabsebene der Fluidfluss in einem geklüfteten Reservoir von den Klüften maßgeblich gesteuert wird. Modelle wie das Dual-Porosity-Modell hingegen berücksichtigen Heterogenitäten und diskrete Klüfte nicht und bilden nur in Abhängigkeit von der Maßstabsebene ein Reservoir adäquat ab. Bei großer oder sehr kleiner Bezugsebene können dann die repräsentativen Ergebnisse wieder übereinstimmen, da sie die Ergebnisse mitteln. Die DFN Modelle liefern das dreidimensionale Grundgerüst, innerhalb dessen individuelle Fluidströme durch die Klüfte beobachtet werden können (Dershowitz et al. 2004).



**Abbildung 6.3** Ein heterogenes Ausgangsgestein aus Matrix, Klüften und Hohlräumen muss für eine Modellierung simplifiziert werden. Dazu bieten sich Dual-Porosity-Modelle (Warren und Root 1963) an oder die Erstellung eines DFN Modells, das die Kluftgeometrie weniger stark vereinfacht darstellt. (verändert nach La Pointe et al. 1997).

Nach der vollständigen Erstellung des DFN Modells kann ein Raster, aufgebaut aus einer beliebigen Anzahl von Rasterzellen, über das DFN Modell gelegt werden. Für jede Rasterzelle werden über Aufskalierungsprozesse Eigenschaften bestimmt, beispielsweise die Permeabilität, die sich aus den Klüften innerhalb dieser Rasterzelle berechnet (siehe Kapitel 6.5.1). Nur EPM Modelle, die auf Grundlage eines DFN Modells erstellt werden, berücksichtigen die durch das Kluftnetzwerk induzierten Inhomogenitäten. Sie kombinieren Kluft- und Matrixeffekte in sich, der Austausch zwischen beiden Medien wird durch den Sigma-Faktor (Gong 2007) beschrieben. Trotz allem ist die Auflösung von EPM Modellen immer noch gering, so dass auch kleine Klüfte innerhalb von Zellen die beispielsweise eine Kantenlänge von 5 m besitzen, nur gemittelt werden. Darum ist auch die Anwendung kombinierter EPM und DFN Modelle möglich, in denen jeder Layer entsprechend seiner Beschaffenheit entweder durch ein EPM oder direkt als DFN Modell dargestellt wird (Dershowitz et al. 2004, Gong 2007).

### 6.3.3 Aufbau und Eingabeparameter eines DFN Modells

Ein DFN Modell ist nur so gut wie die Daten, auf denen es basiert. Eine Verbesserung der Ausgangsdatenlage führt immer zu einer Qualitätsverbesserung des Modells. DFN Modelle vereinen deterministische und stochastische Eingabedaten (Abbildung 6.4). Als deterministisch können beispielsweise Großstrukturen erfasst werden, hingegen kleinräumige Strukturen - wie einzelne Klüfte - über eine stochastische Beschreibung. Verschiedene Quellen werden genutzt, um die für ein DFN Modell stochastischen und deterministischen Eingabeparameter zu bestimmen (FracMan® Fractured Reservoir Analysis & Modelling 2013), dazu zählen:

- 1D Daten: Bohrlochdaten für Orientierung, Intensität, Apertur und Mechanische Zonierung.
- 2D Daten: Aufschlussanalysen mit Photogrammetrie, händisch, LIDAR für Orientierung, Intensität, Terminationskriterien, Länge der Klüfte, mechanische Zonierung.
- 3D Daten: Geozellulärer Input durch strukturelle Restoration, seismische Daten, Kurvaturanalysen.

Aus dieser Datenbasis werden verschiedene Kluftdaten parametrisiert (Blum et al. 2007, Will et al. 2005, Bisdorn et al. 2014):

- Für individuelle Trennflächen/Klüfte
  - Orientierung, Größe, Lokation, Terminationstyp, Apertur, Rauigkeit, Planarität.
- Für das Kluftsystem
  - Scharzugehörigkeit, Chronologie bzw. zeitliche Einordnung, Hierarchie, Termination in %, Intensität, Konnektivität.

Die für ein DFN Modell im Endeffekt wichtigsten geometrischen Inputdaten lauten (Bisdorn et al. 2014, Bigi et al. 2013, FracMan® Fractured Reservoir Analysis & Modelling 2013):

- Größe
- Orientierung
- Intensität
- Andere: Transmissivität, Apertur, Schereigenschaften etc.

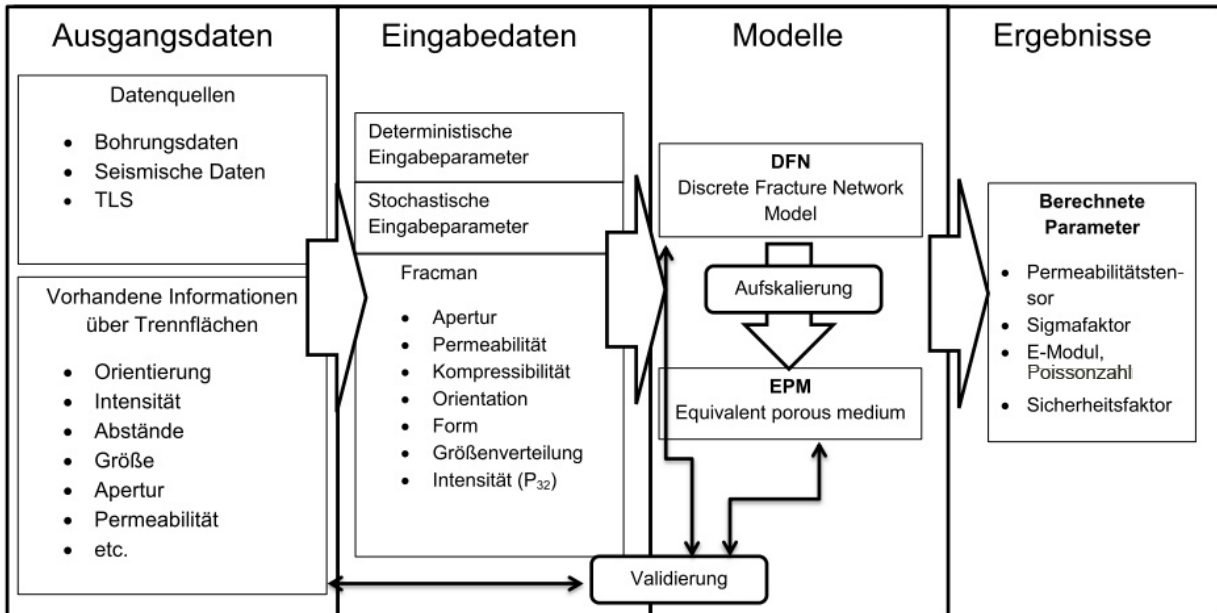
Die Größe und Orientierung der Klüfte sowie die Intensität der Klüftung bilden die Grundlage der geometrischen Eigenschaften des Kluftnetzwerks. Je nach Bestimmung des DFN Modells sind weitere Parameter (wie beispielsweise die Apertur) bei der Berechnung hydraulischer Eigenschaften im Zuge der Modellerstellung notwendig.

Für jeden stochastischen Parameter ist die Festlegung seiner Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion unerlässlich, da diese den endgültigen Eingabeparameter darstellt und diesen eindeutig definiert. Die Genauigkeit dieser Wahrscheinlichkeitsfunktion steigt mit der Größe der Datenbasis an. Ziel ist es, die Datenbasis zu vergrößern, um die DFN Modelle aussagekräftiger zu gestalten.

### 6.3.4 Arbeitsablauf

Die Erstellung eines DFN Modells setzt sich aus mehreren Teilschritten zusammen. Diese sind schematisch in Abbildung 6.4 abgebildet. Der erste Schritt besteht im Transfer der Ausgangsdaten zu Eingabedaten für ein DFN Modell. Unter *Ausgangsdaten* fallen verschiedenste Parameter der Trennflächenanalyse sowie der Erkundung des geologischen Rahmens. Dazu zählt auch die Größe des zu untersuchenden Objekts, das kann beispielsweise ein Reservoir oder ein Aufschluss sein. Parameter wie die Orientierung und Größe von Klüften werden quantifiziert. Unter *Eingabedaten* fallen dann die für ein DFN Modell aufbereiteten Parameter. Aus quantifizierten Ergebnissen werden Wahrscheinlichkeitsfunktionen gebildet, wenn sie in das Modell als stochastische Eingabeparameter implementiert werden sollen. Die Entscheidung, ob Ergebnisse deterministisch oder stochastisch eingebunden werden, hängt von deren Beschaffenheit und Größe ab. Großstrukturen, die vereinzelt vorkommen und exakt lokalisiert sind, werden üblicherweise den deterministischen Eingabeparametern zugeordnet. Kleinstrukturen mit hoher Anzahl werden vereinfacht über die Wahrscheinlichkeitsfunktion dargestellt.





**Abbildung 6.4** Übersicht zum allgemeinen Ablauf bei der Erstellung eines DFN Modells. Ausgangsdaten aus verschiedenen Quellen werden zu Eingabedaten aufgearbeitet, um final ein DFN Modell zu erstellen, das die Möglichkeit zur Aufskalierung bietet und verschiedene Parameter als Ergebnisse quantifiziert.

Nach Erstellung des geologischen Rahmens bzw. der Festlegung der Größe des Modells, wird dieses mit den Eingabeparametern gefüllt. Das Ergebnis ist ein fertiges DFN Modell. Über verschiedene Aufskalierungsprozesse können aus dem DFN Modell Trennflächenparameter auf ein EPM Modell übertragen werden. Bei dem EPM Modell handelt es sich um ein Raster, aufgebaut aus einzelnen Zellen. Den Rasterzellen werden Eigenschaften zugeordnet, die sich aus dem zugrunde liegenden DFN Modell ergeben. Das EPM Modell erstreckt sich über das gesamte DFN Modell.

Sowohl das fertige EPM als auch das DFN Modell können mit den Ausgangsdaten validiert werden. Über diesen Schritt sind dann noch Anpassungen am Modell möglich, falls es Abweichungen - beispielsweise zwischen Intensität der Klüftung im DFN Modell und in den Ausgangsdaten - gibt. Im letzten Schritt gelangt man über das Modell an die Ergebnisse, die sich aus beschreibenden Parametern der Permeabilität oder auch des E-Moduls zusammensetzen.

### 6.3.5 Deterministische Dateneingabe

Ein Teil der Eingabedaten für ein DFN Modell werden deterministisch aufgearbeitet. Generell fallen unter die deterministischen Parameter große, genau lokalisierte und einzeln vorkommende geologische Strukturen. Die Erstellung einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion macht aufgrund ihres seltenen Vorkommens keinen Sinn. Dazu zählen Störungen, Großklüfte oder die Schichtung in einem Aufschluss bzw. Reservoir. Oft befindet sich ihr Maßstab im Meter- bis Dezimeterbereich. Die Schichtung kann exakt lokalisiert wiedergegeben werden, so dass Mächtigkeiten nicht verloren gehen. Die Schichtung wird als einzelne Fläche oder triangulierte Oberfläche ins DFN Modell integriert. Störungen und Großklüfte werden ebenfalls exakt als Fläche unter weiteren Angaben - wie ihrer Apertur und möglichen Zementierung - modelliert. Bei großen Störungsstrukturen spielt weiterhin eine wichtige Rolle, dass das Kluftnetzwerk veränderliche Eigenschaften in der Nähe der Störung aufzeigt. So können sich die Klüfte mit größerer Nähe zur Störung orthogonal zur Störungsfläche ausbilden. Dies kann in einem DFN Modell zusätzlich im Rahmen der Modellierung stochastischer Kluftscharen berücksichtigt werden. Diesen Sachverhalt gilt es im Vorfeld durch eine detaillierte Aufschluss- oder Reservoiranalyse zu bestimmen.

Deterministische Parameter sind immer genauer als stochastische, da sie das reale Bild exakt widerspiegeln. Jedoch ist die Anzahl deterministischer Eingabedaten aus Zeitgründen limitiert.

### 6.3.6 Stochastische Dateneingabe

Insbesondere Informationen über Klüfte, aber auch beispielsweise Schieferungsflächen, werden üblicherweise stochastisch in ein DFN Modell integriert. Aus den Ergebnissen der Analysen in Form von Messtabellen werden Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion parametrisiert. Jegliche Information über die Verortung einzelner analysierter Strukturen geht dabei verloren. Das fertige Modell ist eine statistische Repräsentation des realen Zustands, dessen Genauigkeit von der Genauigkeit der Dichtefunktionen abhängt. Es besteht weiterhin die Möglichkeit, dass Parameter in Abhängigkeit von Großstrukturen/deterministischen Strukturen ihr Verhalten ändern (beispielsweise ihre Intensität oder Raumlage in der Nachbarschaft zu Störungen). Dies kann problemlos in das DFN Modell übertragen werden. Die stochastischen Eingabeparameter machen den Hauptteil und Kern des DFN Modells aus und sind ausschlaggebend für dessen Eigenschaften. In den meisten Fällen beträgt der Anteil stochastischer Trennflächen in Abhängigkeit von der Modellgröße mehr als 99%.

### 6.3.7 Erweiterung der DFN-Eingabedaten durch TLS

Das terrestrische Laserscanning eignet sich hervorragend dazu, um die Datenbasis von DFN Modellen zu erweitern. Laserscans von Aufschlüssen lohnen sich immer dann, wenn Reservoiranaloge erfasst werden sollen, aber auch, wenn beispielsweise die Stabilität eines Hangs oder Tunnels zu ermitteln ist. Durch TLS analysierte Aufschlüsse liefern eine sehr große Datenbasis. Sie vermitteln nicht nur eindimensionale Informationen, wie eine Bohrung, sondern zusätzlich einen Eindruck über lokale Variationen der Kluftparameter. Diese Informationen können mit in das DFN Modell einfließen. Die mit TLS erhobenen Daten werden sowohl den deterministischen als auch den stochastischen Eingabeparametern zugeordnet werden. Großstrukturen wie Störungen, Schichtungen oder auch Großklüfte werden räumlich exakt erfasst und können direkt in ein DFN Modell importiert werden. Zusätzlich erhöht die große TLS Datenbasis die Signifikanz der ermittelten Kluftparameter jeder Kluftschar, denn die ermittelten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen stützten sich auf eine große Anzahl von Daten. Letztendlich wird dadurch die statistische Signifikanz des gesamten Modells erhöht.

Die durch das terrestrische Laserscanning erstellten Punktwolken erlauben eine Identifizierung von Flächen (siehe Kapitel 5.2.3). Diese so erstellten Flächen bilden die Grundlage der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Kluftparameter. Neben dieser stochastischen Eingabe von Kluftflächen bietet sich noch die Option, jede erkannte Kluftfläche aus der Punktwolke deterministisch in das DFN Modell zu importieren. Dazu sind Informationen über die Mittelpunkte, die Raumlage, das Seitenverhältnis und die Größe und Anzahl an Eckpunkten notwendig. Die Anzahl der Eckpunkte sowie das Seitenverhältnis bestimmen die Form der zu modellierenden Klüfte eindeutig. Dabei handelt es sich üblicherweise um Rechtecke, Kreise oder Ellipsen. Diese Werte werden allein aus den 4 Eckpunkten der durch Cloud Compare erkannten Flächen gewonnen. Diese Flächen werden mit einem RANSAC Algorithmus erkannt (Kapitel 5.2.3). Die mathematischen Umrechnungen sind im Anhang zu finden (Kapitel 11).

## 6.4 Simulation/Modelle mit Fracman

In dieser Arbeit wird für die Erstellung von DFN Modellen die Software Fracman von Golder Associates in der Version 7.5 genutzt (Golder Associates 1999-2015). Mit Fracman ist die Aufskalierung hydraulischer und geomechanischer Parameter aus dem DFN Modell möglich sowie die Durchführung von Stabilitätsanalysen an Hängen und in Tunneln.

Fracman wird entwickelt, um Geologen und Ingenieuren „ein einfaches Werkzeug zur Modellierung von geklüfteten Gesteinskörpern, der Gesteinsmechanik und hydrologischer Anwendungen im Bereich des nuklearen und gefährdungsreichen Abfallmanagements, Untergrundkonstruktionen, Bergbau und Kohlenwasserstoffreservoirs zu liefern“ (Golder Associates 1999-2015). Das Programm beinhaltet dazu:

- Analysewerkzeuge, um Rohdaten in Dateiformate zu wandeln, die für die DFN Modellierung benötigt werden.
- Stochastische Simulationen von Kluftparametern, um einen 3D-Raum mit einem Kluftnetzwerk zu füllen.

- Eine Explorationssimulation zur Validierung gewonnener Kluftdaten.
- Die Erstellung Finites-Element-Vermaschungen, um den Durchfluss und die Transportmodellierung im Kluftnetzwerk zu simulieren.

Neben Fracman gibt es auch weitere Softwarepakete, die die Erstellung von DFN Modellen erlauben, dazu gehören beispielsweise Petrel (Schlumberger) oder Move (Midland Valley). In dieser Dissertation wird nur die Software Fracman verwendet, da sie auf DFN-Anwendungen spezialisiert ist und die größte Anzahl an Optionen und Berechnungen bietet.

### 6.4.1 Modellerstellung in Fracman

Die Erstellung eines DFN Modells untergliedert sich in mehrere Teilschritte. Zunächst wird eine Region festgelegt, innerhalb derer die Modellierung durchgeführt wird. Sie gibt den begrenzenden Außenrahmen an. Dabei kann es sich um eine Box (Quader), einen Zylinder, ein Prisma, einen Keil oder einen hufeisenförmigen Tunnel handeln. Das Modell kann weiter unterteilt werden, beispielsweise durch „Traceplanes“, also gerade Flächen, die einzelne geologische Formationen begrenzen. Diese äußeren Geometrien spannen Volumina auf, in denen ein DFN Modell erstellt wird. Jede Traceplane oder Region kann hierbei als Begrenzung des DFN Modells definiert sein. Weiterhin können einzelne Volumina auch mit unterschiedlichen Kluftnetzwerken gefüllt und innerhalb der Geometrien ebenfalls ein Raster vordefinierter Zellgrößen erstellt werden, das zur Aufskalierung hydraulischer Parameter in weiteren Bearbeitungsschritten genutzt wird.

Neben der Integration deterministischer Trennflächen (über Mittelpunkt, Größe, Form, Orientierung, sowie Hinzufügen weiterer Eigenschaften, beispielsweise der Apertur) werden stochastische Klüfte (oder auch Trennflächen) in die Geometrien übertragen. Hier kann entweder eine Region, ein Volumen zwischen Tracemaps oder ein Bereich innerhalb eines Rasters ausgewählt werden, um diesen mit Klüften zu füllen. Nötig ist dafür die Angabe der Intensität ( $P_{32}$ ), der Größe und Form (über die Anzahl der Eckpunkte und das Seitenverhältnis), der Raumlage (Einfallrichtung und Einfallswinkel), der Terminationswahrscheinlichkeit gegenüber anderen Kluftscharen oder Flächen, sowie 3 weiterer Parameter, der Apertur, Permeabilität und Kompressibilität bzw. der Apertur, Transmissivität und des Speicherkoeffizienten (siehe dazu Kapitel 6.4.3). Zur weiteren Analyse können zusätzlich Bohrungen (Bohrungspfade) in das Modell integriert werden.

### 6.4.2 Berechenbar in Fracman

Über das fertige DFN Modell kann nun ein dreidimensionales Raster („Grid“) definierter Größe gelegt werden. Hierzu wird sowohl die Anzahl der Gridblöcke in die 3 Raumrichtungen als auch die räumliche Ausdehnung definiert. DFN Modelle erlauben es über einen Aufskalierungs-Prozess Kluftnetzwerkeigenschaften auf Rastereigenschaften zu übertragen (Abbildung 6.4). Zu den aufskalierbaren Eigenschaften zählen:

- Sigma-Faktor (Kapitel 6.5.2)
- Kluftanzahl,  $P_{32}$  und  $P_{33}$
- Oda Permeabilität (Kapitel 6.5.1) und dynamisch-hydraulische Parameter (Kapitel 6.5.4)
- Elastizitätsmodul und Poissonzahl (Kapitel 6.5.3).
- Sicherheitsfaktor, rutschunggefährdete Blöcke (6.6.6)
- Blockgrößen (Kapitel 6.6.7)

Weiterhin gehören auch Subsidenzberechnungen, hydraulisches Fracking usw. zum Repertoire der Software. Auf diese wird aber in den folgenden Kapiteln nicht weiter eingegangen, sie werden nur der Vollständigkeit halber in diesem Kontext genannt.

### 6.4.3 Einheiten in Fracman

Vor der Erstellung eines Modells mit Fracman werden die Einheiten der Parameter eindeutig festgelegt sein. Zudem ist zu definieren, welche Eigenschaften den Klüften des DFN Modells immer und eindeutig zugeordnet sein müssen („Reserved Properties“) (Golder Associates 1999-2015). Entweder gehören zu diesen Eigenschaften die Permeabilität, Kompressibilität und Apertur oder die Transmissivität, der Speicherkoeffizient und die Apertur der Klüfte. Mit Hilfe der Dichte, Kompressibilität und Viskosität eines angenommenen Fluids in den Klüften können diese Einheiten

ineinander umgerechnet werden. Im Folgenden werden ihre Eigenschaften und Beziehungen zueinander beleuchtet.

Der *Speicherkoeffizient* beschreibt die Fähigkeit der Kluft (oder auch eines Matrixgesteins) ein Fluid über eine gewisse Fläche zu speichern bzw. abzugeben. Dieser ist dimensionslos (Singhal und Gupta 2010).

Der Speicherkoeffizient  $S$  ist direkt verknüpft mit der Kompressibilität  $C$ , daher kann auch zwischen beiden Einheiten in Fracman gewechselt werden. Für eine Kluft gilt der folgende Zusammenhang des Speicherkoeffizients  $S_f$  und der Kluftkompressibilität  $C_f$ :

$$S_f = \rho_w g \varphi_f b \left( C_w + \frac{C_f}{\varphi_f} \right) \quad 6.1$$

Mit  $\rho_w$  als der Dichte von Wasser bzw. des Fluids in der Kluft,  $C_w$  die Kompressibilität dieses Fluids,  $g$  der Erdbeschleunigung,  $\varphi_f$  die Kluftporosität,  $C_f$  die Kluftkompressibilität und  $b$  der Apertur der Kluft.

Die *Transmissivität*  $T$  ist die Durchflussrate eines Fluids durch eine entsprechende Fläche unter einem gegebenen hydraulischen Gradienten.

Die *Kompressibilität* der Klüfte beeinflusst die möglichen Produktionsraten aus einem Reservoir. Wenn der Fluiddruck während der Förderung sinkt, so beginnen die Klüfte sich zu schließen und beeinflussen direkt die Permeabilität eines geklüfteten Reservoirs. Der Zusammenhang lautet nach Reiss (1980):

$$\frac{k}{k_i} = (1 - C_f \Delta P)^3 \quad 6.2$$

Mit der nun neu zu berechnenden Permeabilität  $k$ , der Ausgangspermeabilität  $k_i$ , der Kluftkompressibilität  $C_f$  und der Änderung des Drucks  $\Delta P$ .

Die *Kluftkompressibilität* der Klüfte  $C_f$  wird aus der Veränderung der Kluftporosität  $\varphi_f$  bzw. der Apertur- und Druckveränderung ( $\Delta b$  und  $\Delta P$ ) berechnet (Reiss 1980):

$$C_f = -\frac{1}{\varphi_f} \Delta \varphi_f = -\frac{1}{b} \frac{\Delta b}{\Delta P} \quad 6.3$$

Generell wird davon ausgegangen, dass die Gesteinsmatrix eine niedrige Permeabilität und hohe Speicherkapazität besitzt, während es bei Klüften genau umgekehrt ist (Warren und Root 1963). Um den Fluidfluss zwischen der Matrix des Gesteins und den Klüften zu beschreiben, werden zwei dynamische Parameter eingeführt, der Interporositätsflusskoeffizient  $\lambda$ , der den Fluidaustausch direkt beschreibt, und  $\omega$  das Verhältnis der Speicherkoeffizienten der Matrix und der Klüfte, das schlussendlich den relativen Anteil der Kluftspeicherkapazität im Reservoir beschreibt (Warren und Root 1963, Bahrami et al. 2012).

$$\lambda = \sigma \frac{k_m}{k_f} r_w^2 \quad 6.4$$

$$\omega = \frac{\varphi_f C_f}{\varphi_f C_f + \varphi_m C_m} \quad 6.5$$

$k_m$  ist die Matrixpermeabilität,  $k_f$  die Kluftpermeabilität,  $r_w$  der Durchmesser einer Bohrung, durch die das Reservoir beprobt bzw. untersucht wird,  $\delta$  ist der Sigmafaktor.  $\varphi_f$  ist die Porosität der Klüfte,  $C_f$  die Kompressibilität der Klüfte und  $C_m$  die Kompressibilität der Matrix. Eine höhere Produktivität wird mit abnehmenden  $\lambda$  und steigendem  $\omega$  erreicht. Beide Parameter können über Messungen in Bohrungen bestimmt werden (Bahrami et al. 2012). Es kann davon ausgegangen werden, dass in Reservoiren  $C_f$  10- bis 100-mal größer ist als  $C_m$  (Tiab und Donaldson 2011).

### 6.4.4 Manuelle Überprüfung der Verteilungen in Fracman

Falls die ermittelte Verteilungsfunktion der Größe der Klüfte oder der Intensität nicht eindeutig ist, können diese durch Simulation eines DFN Modells überprüft werden. Dazu wird eine mögliche, passende Verteilungsfunktion abgeschätzt und auf deren Grundlage ein DFN Modell erstellt. Letzteres wird dann beprobt. Für die Kluftgröße bietet sich eine Quantifizierung der Kluftspurlänge entlang einer „Trace Plane“ an (siehe auch Kapitel 5.2). Die Intensität kann über Beprobung entlang einer Bohrung überprüft werden, diese liefert in Fracman den  $P_{10}$ -Intensitätswert. Die gewonnenen Statistiken werden mit den Ausgangsdaten verglichen und der Vorgang mit veränderlichen Parametern solange wiederholt, bis die beiden Ergebnisse weitestgehend übereinstimmen.

### 6.4.5 Ermittlung der Orientierung von Klüften in Fracman

In Kapitel 2.3.1 wird beschrieben, wie über eine Clusteranalyse nach dem k-means Algorithmus die mittleren Orientierungen verschiedener Kluftscharen gewonnen werden können. So ist eine Unterteilung und Identifizierung von Kluftscharen aus dem Gesamtdatensatz möglich. In Fracman ist ebenfalls ein Werkzeug zur Orientierungsanalyse integriert. Dieses berücksichtigt, ebenso wie der k-means Algorithmus, alle vorkommenden Orientierungen und unterteilt sie in angemessene Scharen. Dazu müssen die Orientierungswerte, die aus den Punktwolken gewonnen werden, in Fracman integriert werden. Dabei bietet es sich an, die Orientierungen als Punktwerte zu importieren und danach auszuwerten. Die Methode heißt ISIS (Interactive Set Identification System) und identifiziert Scharen in Orientierungswerten (Golder Associates 2015). Ausgehend von möglichen Clusterzentren, die vom Bearbeiter vorgegeben werden, berechnet ISIS die Verteilung der Orientierung um dieses Zentrum. Orientierungen werden einer Schar anhand von gewichteten Wahrscheinlichkeiten proportional zur Gleichheit einer einzelnen Orientierung zu anderen Orientierungen dieser Schar zugeordnet. Dieser Schritt wird solange wiederholt, bis die Zugehörigkeit einer Orientierung zu einer Schar als optimal angesehen wird (Golder Associates 1999-2015). ISIS beruht auf einem adaptiven, probabilistischen Mustererkennungsalgorithmus. Die Wahrscheinlichkeiten, dass eine Orientierung zu einer jeweiligen Schar gehört, werden durch ISIS berechnet und gegeneinander aufgewogen, um eine finale Entscheidung zu treffen.

Für die einzelnen Teilbereiche des Steinbruchs Eberstadt (siehe Abbildung 6.10) werden die Ergebnisse des k-means und ISIS Algorithmus miteinander verglichen. Die 2 Teilbereiche B-3 und B-4 werden zudem im folgenden Abschnitt noch einmal genauer untersucht.

Die Ergebnisse des ISIS Algorithmus sind in Tabelle 6.1 und Tabelle 6.2 zusammengefasst. Sehr variabel ist hierbei die am besten passende, beschreibende Verteilungsfunktion. Jede der 4 möglichen Verteilungen ist in den Ergebnissen vorhanden. Teilweise sind die KS-Wahrscheinlichkeiten, ein Maß dafür, inwieweit die Daten einer Verteilung folgen, sehr niedrig und liegen unter 20%. Keine der 4 Verteilungen passt dabei wirklich auf die Orientierungsdaten. Das ist vor allem in der starken Streuung der ermittelten Werte begründet, die eine eindeutige Zuordnung zu einem Cluster erschwert. Eindeutigere Ergebnisse würden über eine Ausdünnung der Daten erreicht, z. B. über eine Entfernung von Ausreißern. Das würde aber die ursprünglichen Daten verfälschen und eine objektive Bewertung erschweren. Nur für 3 der Teilbereiche können lediglich 2 Kluftscharen identifiziert werden. Allgemein wird davon ausgegangen, dass sowohl Schar 1 als auch 2 das hydraulisch aktive, orthogonale Kluftnetzwerk darstellen. Schar 3 wird größtenteils als Schichtung interpretiert, wobei die Ergebnisse deutlich schwanken. In den folgenden Abschnitten wird auf diese Problematik noch einmal explizit hingewiesen, zusätzlich werden die Ergebnisse korrigiert.

**Tabelle 6.1** Ergebnisse des ISIS Algorithmus für die Teilbereiche A1 bis A6. Die mittleren Orientierungen, die angenommene Verteilung sowie die KS-Wahrscheinlichkeit (Kolmogorow-Smirnow-Test) sind für jede identifizierte Kluft­schar angegeben.

Schar	Orientierung	Verteilung	KS-Wahrscheinlichkeit	Teilbereich
1	197/86	Bivariate Bingham	98%	A-1
2	116/89	Fisher	28%	A-1
3	306/05	Fisher	14%	A-1
1	013/89	Elliptische Fisher	75%	A-2
2	130/80	Elliptische Fisher	90%	A-2
3	006/21	Elliptische Fisher	80%	A-2
1	191/87	Fisher	18%	A-3
2	109/86	Bivariate Bingham	25%	A-3
3	336/03	Elliptische Fisher	17%	A-3
1	203/87	Bivariate Bingham	92%	A-4
2	107/88	Bivariate Bingham	71%	A-4
3	078/47	Bivariate Bingham	28%	A-4
1	198/87	Bivariate Bingham	86%	A-5
2	115/85	Elliptische Fisher	24%	A-5
3	272/59	Bivariate Bingham	83%	A-5
1	197/89	Bivariate Bingham	97%	A-6
2	119/84	Elliptische Fisher	16%	A-6
3	053/04	Elliptische Fisher	30%	A-6

**Tabelle 6.2** Ergebnisse des ISIS Algorithmus für die Teilbereiche A1 bis A6. Die mittleren Orientierungen, die angenommene Verteilung sowie die KS-Wahrscheinlichkeit (Kolmogorow-Smirnow-Test) sind für jede identifizierte Kluft­schar angegeben.

Schar	Orientierung	Verteilung	KS-Wahrscheinlichkeit	Teilbereich
1	176/88	Bivariate Bingham	51%	B-1
2	122/86	Bivariate Bingham	99%	B-1
3	356/16	Fisher	33%	B-1
1	187/87	Bivariate Bingham	89%	B-2
2	128/89	Bivariate Bingham	89%	B-2
3	-	-	-	B-2
1	189/89	Fisher	21%	B-3
2	115/83	Elliptische Fisher	26%	B-3
3	179/53	Elliptische Fisher	15%	B-3
1	209/87	Elliptische Fisher	90%	B-4
2	108/87	Elliptische Fisher	22%	B-4
3	096/43	Elliptische Fisher	58%	B-4
1	200/89	Bivariate Bingham	77%	B-5
2	088/89	Bivariate Bingham	29%	B-5
3	-	-	-	B-5
1	171/89	Bivariate Bingham	27%	B-6
2	299/89	Bivariate Bingham	10%	B-6
3	-	-	-	B-6

Ein Vergleich des ISIS- mit dem k-means-Algorithmus zeigt sowohl große Übereinstimmungen als auch Abweichungen (Tabelle 6.3). Bei der Anwendung des ISIS Algorithmus werden maximal 3 sinnvolle Scharen identifiziert. Zwar ist auch die Identifizierung eines 4ten generell möglich, hält aber weder einer statistischen (KS-Wahrscheinlichkeit) noch visuellen (im Stereogramm) Überprüfung stand. Für 2 Teilbereiche (A-4 und B-4) identifiziert der k-means Algorithmus eine vierte Kluft­schar. Für die Schar 3, die repräsentativ die Schichtung darstellt, fallen die Ergebnisse ebenfalls variabel aus. Oftmals erkennt der k-means Algorithmus keine 3te Kluft­schar. In den Teilbereichen A-4, A-5, B-1

und B-3 findet ausschließlich der ISIS Algorithmus eine 3te Kluftschar. Die Ergebnisse dieser Schar sind allerdings höchst variabel. Sie wird als Schichtung angesprochen, weist aber in den Teilbereichen A-4, A-5, B-3 und B-4 einen hohen Einfallswinkel auf, der nicht zu der nahezu horizontal verlaufenden Schichtung passt. Aus diesem Grund werden die Teilbereiche B-3 und B-4 noch einmal genauer untersucht.

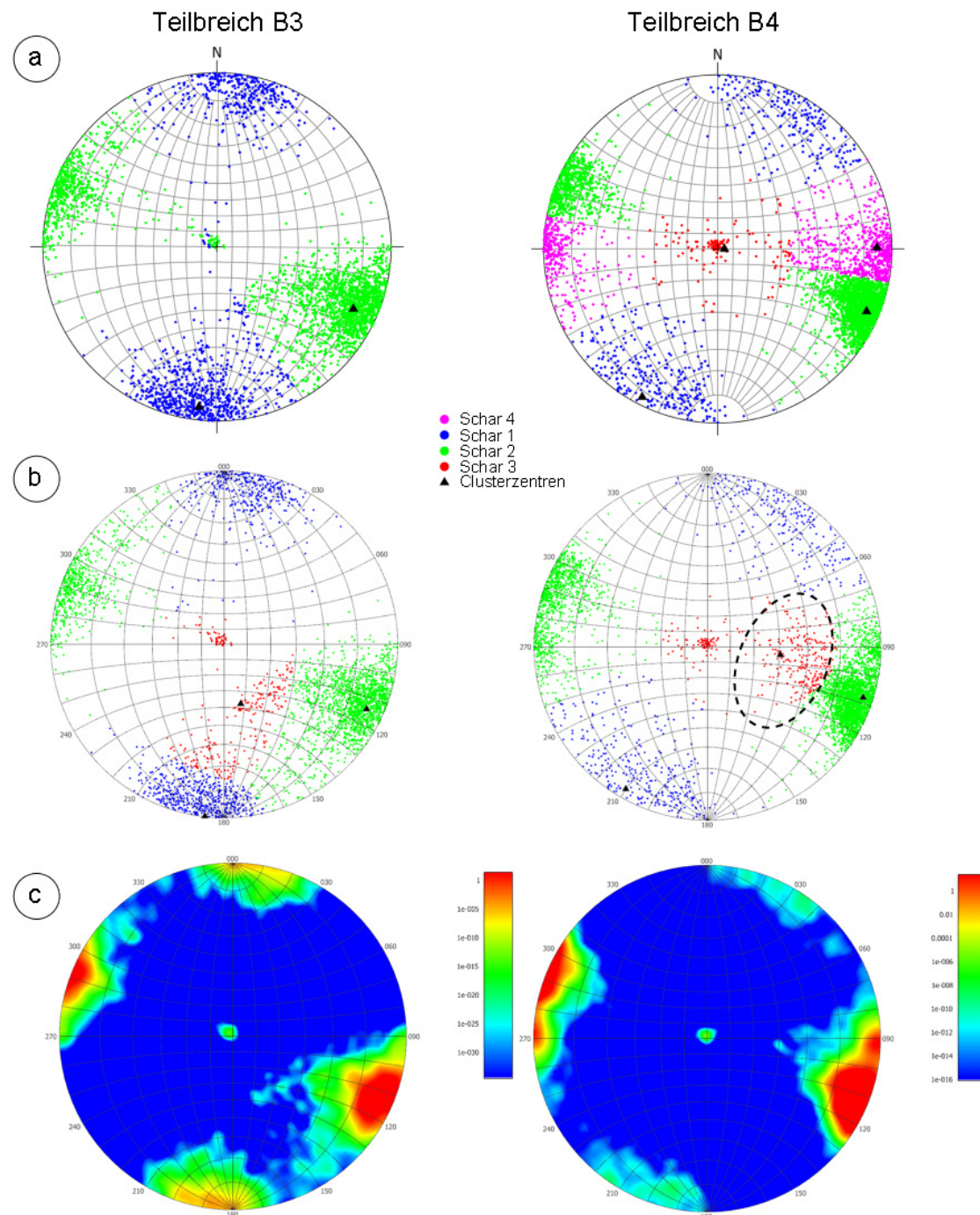
Für die beiden Hauptklüftungen der Schar 1 und 2 stimmen die Ergebnisse von ISIS und k-means gut überein. Hier ist kein direkter Vorteil durch eine der beiden Methoden gegeben.

**Tabelle 6.3 Vergleich der Ergebnisse des k-means und ISIS Algorithmus\ der einzelnen Teilbereiche im Aufschluss Eberstadt.**

	Schar 1		Schar 2		Schar 3		Schar 4	
Bereich	k-means	ISIS	k-means	ISIS	k-means	ISIS	k-means	ISIS
A-1	017/85	197/86	296/80	116/89	128/04	306/05	257/43	-
A-2	012/89	013/89	295/87	130/80	175/21	006/21		
A-3	011/86	191/87	289/85	109/86	219/02	336/03		
A-4	023/85	203/87	287/87	107/88		078/47		
A-5	200/85	198/87	292/78	115/85		272/59		
A-6	195/89	197/89	298/84	119/84	321/08	053/04		
B-1	357/88	176/88	303/86	122/86	-	356/16	269/84	
B-2	008/88	187/87	309/88	128/89	-	-		
B-3	006/85	189/89	294/81	115/83	-	179/53		
B-4	027/87	209/87	292/85	108/87	271/04	096/43		
B-5	020/89	200/89	273/82	088/89	-	-		
B-6	173/89	171/89	300/89	299/89	-	-		

Im Folgenden werden die Teilbereiche B-3 und B-4 genauer betrachtet (Abbildung 6.5). Für den Teilbereich B-3 werden durch den k-means Algorithmus (Abbildung 6.5 a und Tabelle 6.3) nur 2 Kluftscharen erkannt. Deutlich wird allerdings, dass auch im horizontalen Bereich des Stereogramms Polpunkte vorzufinden sind, die durch den Algorithmus keiner Schar eindeutig zugewiesen werden können. Im Teilbereich 4 wird die Schichtung erkannt, eindeutige Ergebnisse werden dann erzielt, wenn von 4 Scharen ausgegangen wird. Bei der Wahl von 3 Scharen als Anfangsparameter für den k-means Algorithmus kann wiederum die Schichtung nicht eindeutig identifiziert werden. Der ISIS-Algorithmus (Abbildung 6.5 b und Tabelle 6.3) identifiziert in beiden Teilbereichen 3 Kluftscharen. Die Wahl von 2 oder 4 Clusterzentren führt nicht zu eindeutigen Ergebnissen. Der Schar 3 sind Polpunkte zugeordnet, die eindeutig nicht zur Schichtung und dem horizontalen Cluster gehören (rot). Diese Punkte verzerren das Ergebnis dieses Clusters, so dass in Teilbereich B-4 ein hoher Einfallswinkel von 43° für die Schichtung berechnet wird. Ähnlich sieht es in Teilbereich B-3 aus, wo für die Schichtung sogar ein Einfallswinkel von 53° quantifiziert wird. Die Dichteplots der beiden Teilbereiche sind eindeutiger und zeigen klar 3 Clusterzentren, an denen sich die Punkte häufen und stellvertretend für die 3 Kluftscharen stehen (Abbildung 6.5 c).





**Abbildung 6.5** Polpunktdarstellung der beiden Teilbereiche B-3 und B-4. (a) Identifizierung von Clusterzentren über einen k-means Algorithmus. (b) Anwendung des ISIS Algorithmus zur Clusterbildung. (c) Dichteplotdarstellungen der beiden Teilbereiche.

Die Punktwolke des Teilbereichs 4 wird ausgewählt, um einen detaillierteren Blick auf die Orientierungsergebnisse zu erhalten (Abbildung 6.6). Über das Stereogramm werden Polpunkte bestimmt, die nicht eindeutig den Hauptrichtungen zuzuordnen sind und durch die gestrichelte Ellipse in Abbildung 6.5b markiert sind. Der Orientierungsbereich wird nun in der Punktwolke visualisiert (Abbildung 6.6). Zum einen werden diese Orientierungen rot in der RGB-Punktwolke markiert und zum anderen alle Punkte unter Berücksichtigung ihrer Orientierung über den HSV-Farbraum (vgl. auch Kapitel 5.1) eingefärbt.

Ein Abgleich der originalen Punktwolke mit der nach der Orientierung eingefärbten Punktwolke zeigt deutlich, dass diesem Orientierungsbereich Schuttflächen zuzuordnen sind. Es handelt sich dabei nicht um Kluftflächen oder die Schichtung. Die Hauptklüftungen sind eindeutig in Rot/Blau, Grün/Türkis sowie Violett dargestellt. Die umkreisten Bereiche liegen leicht außerhalb dieser Farbbereiche und

weisen aufgrund des flachen Einfallens eine geringere Farbsättigung auf. Visualisiert sind diese Bereiche als rote Punkte direkt auf der RGB-Punktwolke.

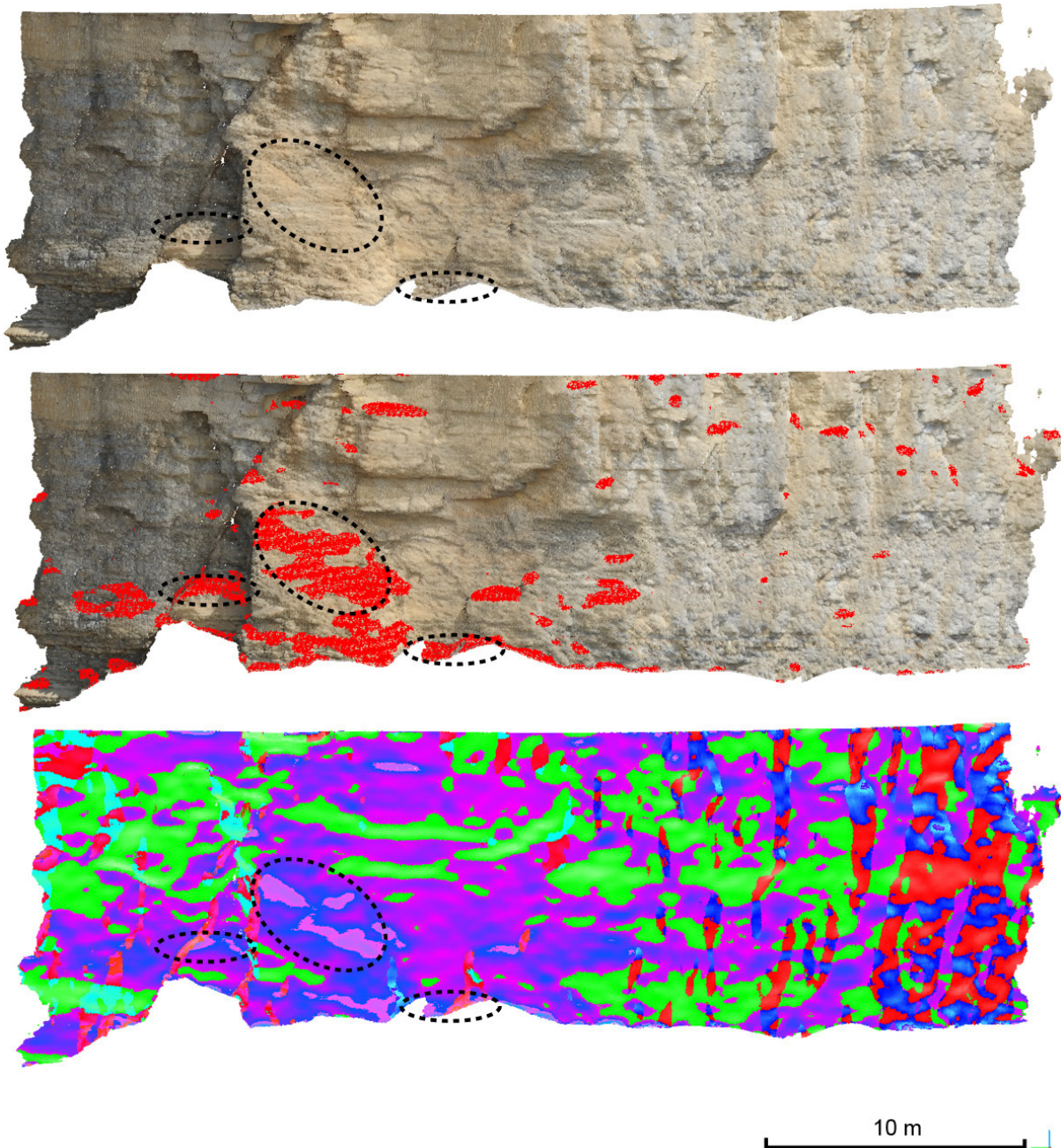


Abbildung 6.6 Detaillierte Ansicht des Teilbereichs B4 des Steinbruchs Eberstadt (oben). Gestrichelt umrandet sind dabei die näher untersuchten Teilbereiche und ihre zugehörige Orientierung. Die Auswahl eines Orientierungsbereiches erlaubt eine visuelle Differenzierung auf der Punktwolke (Mitte). Eine Darstellung im HSV-Farbraum kennzeichnet alle Orientierungen farblich und lässt die visuelle Identifizierung von Orientierungen und ihre Verteilung zu (unten).

Die visuelle Überprüfung zeigt eindeutig, dass es sich bei den untersuchten Polpunkten nicht um Klüfte handelt. Diese müssen für die Betrachtung der Orientierungen entfernt werden. Sie verzerren die Ergebnisse (in diesem Fall die Orientierung der Schichtung) deutlich. Die beiden Suchalgorithmen k-means und ISIS können diese Bereiche nicht gesondert filtern. Solche Bereiche müssten manuell vom Bearbeiter entfernt werden, um genaueste Ergebnisse zu erzielen. Für die Erstellung eines DFN Modells sind nur reine Trennflächen und insbesondere Klüfte von Bedeutung. Ein automatischer Filterprozess ist nicht möglich. Da diese Schuttkörper in sich eine Fläche ergeben, werden diese bei



der ursprünglichen Flächenidentifizierung in der Punktwolke immer miterkannt und können auch in diesem Arbeitsschritt nicht gefiltert werden.

Um einen anwendbaren Wert für die Schichtung zu erlangen, der als Eingabeparameter für das DFN Modell dienen kann, werden diejenigen Punkte, die Schuttflächen zuzuordnen sind, in der Auswertung entfernt. Dazu werden alle Punkte, die mit mehr als 20° einfallen, über einen Filter aussortiert. So können die Orientierungen der Schuttflächen und ebenso alle anderen Kluftscharen rausgefiltert werden. Für die übrigen Polpunkte wird wiederum der ISIS-Algorithmus zur Untersuchung angewendet. Das Ergebnis ist nun eindeutiger und weist zudem eine sehr hohe KS-Wahrscheinlichkeit auf (Tabelle 6.4). Dieser finale Wert kann nun als Eingabeparameter für ein DFN Modell genutzt werden.

**Tabelle 6.4 Korrigiertes Ergebnis für die Orientierung der Schichtung nach Filtern der Schuttflächen.**

Korrigierte Schichtung	Orientierung	Verteilung	KS-Wahrscheinlichkeit
3	358/06	Bivariate Normalverteilung	95%

Beide vorgestellten Methoden eignen sich zur Identifizierung von Orientierungsklustern. Der ISIS Algorithmus besitzt jedoch Vorteile bei der Identifizierung von Clustern aus nur wenigen Punkten. Bereiche, die keiner Trennflächenschar eindeutig zuzuordnen sind, sollten im Voraus entfernt werden. Nach diesem Filterprozess erkennen beide Algorithmen eindeutig die vorhandenen Trennflächenscharen aus den gegebenen Orientierungswerten.

### **Bootstrapping**

In Fracman ist zusätzlich ein Orientierungs-Bootstrapping möglich, das dann Anwendung findet, wenn die zugrunde liegende statistische Verteilung der Orientierungswerte nicht eindeutig ist. Dies ist oft bei einer limitierten Anzahl vorhandener Messwerte oder bei sehr dispers verteilten Orientierungen der Fall. Auf Grundlage der Verteilung der Originaldaten werden zufällig multiple Datensätze erstellt, die dann den Originaldatensatz ersetzen. Oft ist so eine genauere Bestimmung der Orientierungskluster möglich.

## **6.5 Aufskalierungsprozesse**

Durch das Aufskalieren der Kluftigenschaften innerhalb eines Rasters des erstellten Modells lässt sich eine Aussage über Reservoireigenschaften innerhalb jeder Zelle treffen. Das Aufskalieren ermöglicht die Ermittlung hydraulischer oder geomechanischer Eigenschaften von DFN Modellen. Die Methoden sind in diesem Kapitel detailliert erläutert.

### **6.5.1 Oda Methode**

Um den Fluidfluss in Klüften zu beschreiben wird im Allgemeinen das „Cubic Law“ herangezogen, das sich aus den *Navier-Stokes*-Gleichungen für die Strömung von newtonischen Flüssigkeiten und Gasen (wie Wasser und Luft) ableitet. Konkret wird das Strömungsverhalten in einem parallelen Plattenmodell durch das *Cubic Law* beschrieben (Abbildung 6.7) (Snow 1965, Witherspoon 1979, Sarkar 2004, Lee 1993). In seiner allgemeinen Form lautet das *Cubic Law* (Klimczak 2010, Lee 1993):

$$Q = \frac{-\rho_f g b^3 \nabla h}{12\mu} \quad 6.6$$

Für eine Kluft der Höhe  $H$  [m], die von einem Fluid durchflossen wird (Abbildung 6.7) gilt abgeleitet aus Formel 6.6:

$$Q = \frac{-\rho_f g b^3 \nabla h H}{12\mu} = T \nabla h H \quad 6.7$$

Hier ist  $Q$  [m<sup>3</sup>/s] der Fluss zwischen den Platten bzw. zwischen den Klüften, Apertur  $b$  [m] und  $\rho_f$  die Dichte des Fluids [kg/m<sup>3</sup>],  $g$  die Erdbeschleunigung [m/s<sup>2</sup>],  $\mu$  die Viskosität des Fluids [Pa s] und  $\nabla h$  der hydraulische Gradient [Pa]. Der Fluidfluss in einer Kluft wird als laminarer Fluss eines viskosen, inkompressiblen Fluids definiert. Für diesen laminaren Fluss kann man in Analogie zum parallelen, planaren Plattenmodell die hydraulische Durchlässigkeit (Konduktivität)  $k_f$  [m/s] über folgende Gleichung beschreiben (Witherspoon 1979, Sarkar 2004, Lee 1993):

$$k_f = \frac{(2b)^2 \rho_f g}{12\mu} \quad 6.8$$

Diese Gleichung leitet sich aus der allgemeineren Formulierung des Cubic Laws (Formel 6.6) ab. Die Formel kann unabhängig vom Gesteinstyp angewendet werden (Witherspoon 1979) und ist, neben den Fluideigenschaften, nur abhängig vom Kluftparameter Apertur.

Nach Sarkar (Sarkar 2004) ergibt sich für die Permeabilität einer Kluft aus dem Cubic Law und dem Darcy Gesetz für einen Durchfluss durch ein poröses Medium aus Gleichung 6.8 unter Vernachlässigung der Fluideigenschaften (siehe auch Wilson 2011) der Zusammenhang:

$$k = \frac{b^2}{12} \quad 6.9$$

Das Produkt aus Permeabilität  $k$  und der Fläche  $A$  [m<sup>2</sup>] der Kluft ist kongruent zu dessen Transmissivität:

$$T \equiv kA = \frac{lb^3}{12} \quad 6.10$$

Mit der Transmissivität  $T$  [m<sup>2</sup>/s] und der Länge der Kluft  $l$  [m]. Unter Berücksichtigung der Fluideigenschaften ergibt sich direkt aus der Formel des Cubic Laws ebenfalls (Will 2005, Dershowitz 2012, Lee 1993):

$$T = \frac{\rho_f g b^3}{12\mu} \quad 6.11$$

Das Cubic Law und die daraus abgeleiteten Formeln beschreiben den Fluidfluss zwischen zwei ideal-flachen Platten. Der Abstand der Platten entspricht der Apertur  $b$ . Diese mechanische Apertur gleicht aber nicht der reellen Apertur zwischen zwei Gesteinswänden. Kluftoberflächen sind oft sehr unregelmäßig und können sich lokal auch an Punkten entlang der Länge  $l$  wieder berühren. Die effektive Apertur, durch die ein Fluid fließen kann, nennt man daher auch hydraulische Apertur  $b_h$ . Sie ist niedriger als die mechanische Apertur und beeinflusst maßgeblich den Fluidfluss. Eine Korrelation zwischen  $b$  und  $b_h$  ist bisher in der Literatur nur mit bescheidenem Erfolg dargelegt (Klimczak et al. 2010). Die effektive hydraulische Apertur von Klüften in Karbonaten kann in Größenordnungen von 0,05 mm bis 1 mm liegen (Dershowitz und La Pointe 2007).

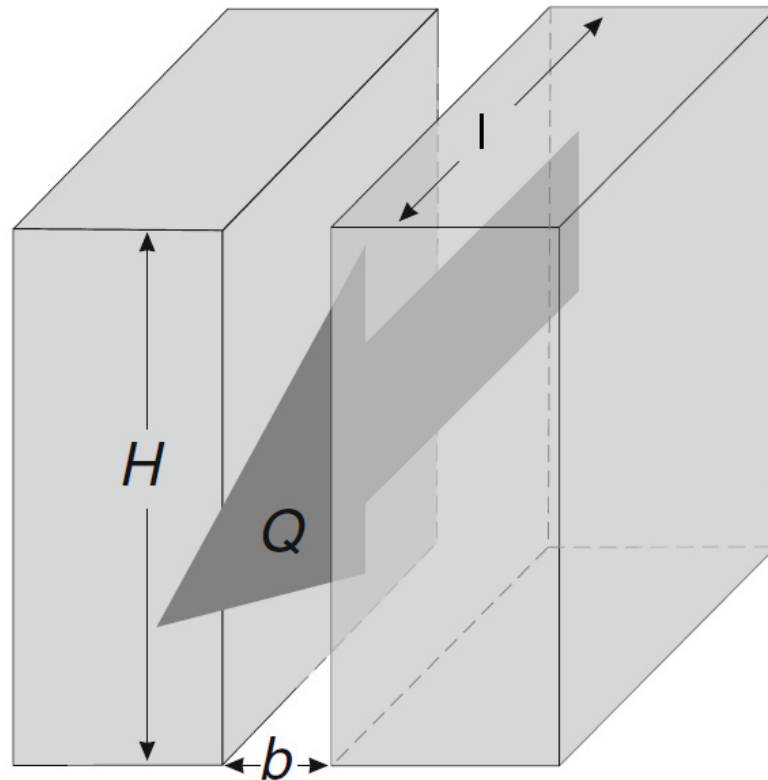


Abbildung 6.7 Der Fluidfluss  $Q$  zwischen 2 Platten nach dem “parallelen Platten-Modell“, bzw. zwischen zwei Kluftwänden. Die Kluft besitzt die Apertur  $b$ , die Länge  $l$  und die Höhe  $H$  (verändert nach Klimczak et al. 2010).

Die Methode von Oda (Oda 1985) wird genutzt, um einen Permeabilitätstensor in alle 3 Dimensionen zu kreieren. Dieser Tensor ist eine vereinfachte Darstellung von Darcys Gesetz des laminaren Fluidflusses durch ein isotropes, poröses Medium. Die Oda Methode berechnet für jede Rasterzelle den entsprechenden Beitrag der Klüfte zur Permeabilität (Golder Associates 1999-2015). Die wichtigste Rolle spielen hierbei die Geometrie (Apertur, Fläche) der Klüfte und Eigenschaften wie die Transmissivität (oder Permeabilität). Die Methode überlagert das EPM-Raster und weist jeder Zelle des Rasters Eigenschaften auf Grundlage des Permeabilitätstensors zu, der die individuellen Eigenschaften des Kluftnetzwerks in jener Zelle berücksichtigt (Dershowitz et al. 2004).

Für eine bestimmte Rasterzelle (als äquivalent zu einer Gesteinsvolumeneinheit) lautet der empirische Klufttensor  $F_{ij}$ , der die Kluftflächen  $A$  und die Transmissivitäten  $T$  der Klüfte in der Rasterzelle mit Volumen  $V$  gewichtet mittelt:

$$F_{ij} = \frac{1}{V} \sum_{k=1}^N A_k T_k n_{ik} n_{jk} \quad 6.12$$

Mit  $n$  als Einheitsvektor in verschiedene Raumrichtungen (i,j,k).  $F_{ij}$  ist ein Vektor entlang des Normaleinheitsvektors der Kluft, der den Fluidfluss in jener Kluft darstellt. Da allerdings eine Kluft als impermeabel entlang einer Richtung parallel zum Normalvektor angenommen werden kann, muss der Vektor  $F_{ij}$  dementsprechend noch in die Fläche der Permeabilität rotiert werden. Der Ansatz nach Oda liefert so den Permeabilitätstensor  $k_{ij}$ :

$$k_{ij} = \frac{1}{12} (F_{kk} \delta_{ij} - F_{ij}) \quad 6.13$$

Der Parameter  $\delta_{ij}$  ist das mathematische Kroenecker-Delta. Auch der Permeabilitätstensor wird für jede Rasterzelle einzeln berechnet.

Die Genauigkeit der Ergebnisse des Oda Ansatzes nimmt mit zunehmender Zellengröße ab, so bereits ab wenigen Zehnermetern Kantenlänge der Rasterzellen. Nichtsdestotrotz stellt die Oda Methode einen guten Kompromiss zwischen Rechenzeit und Genauigkeit der Modellierung dar (Dershowitz et al. 2004).

Der Ansatz nach Oda benötigt keine Flusssimulation (*Flow-Modeling*), dies allerdings auf Kosten der Einbeziehung der Konnektivität der Klüfte zueinander (Will et al. 2005). Im Gegensatz zu Durchfluss- oder Transport-Modellierungen, die sich auf eine Kluftanzahl bis maximal  $10^5$  beschränken, können im Oda Ansatz bis zu  $10^7$  Klüfte bei der Berechnung eingebunden werden (Dershowitz et al. 2004).

### 6.5.2 Sigma Faktor

Zur vollständigen Beschreibung des Fluidflusses in einem „Dual-Porosity-Modell“ wird die Porosität der Trennflächen, die Permeabilität und der mögliche Fluidtransfer zwischen beiden Medien, Matrix und Trennfläche, benötigt. Der Transfer wird über den sogenannten Sigmafaktor (auch „shape-factor“) beschrieben. Dieser ist abhängig von der Geometrie der Trennflächen und kontrolliert die Interaktionen zwischen der Matrix des Gesteins und dem Trennflächengefüge (Gong 2007, Li et al. 2011). Er ist definiert als die Trennflächenoberfläche der einzelnen Matrixblöcke im Reservoir, denn diese Oberfläche bestimmt die Rate und Menge des möglichen Transfers. Der Sigmafaktor beschreibt die Dimension des Fluidflusses und spielt eine entscheidende Rolle in einem Dual-Porosity-Modell. Erste theoretische Grundlagen liefert hierzu Kazemi (Kazemi et al. 1976).

Zur Bestimmung werden in das ursprüngliche Trennflächenmodell imaginäre Bohrungen gelegt, jeweils in x-, y- und z-Richtung. Entlang dieser Bohrungen wird der Trennflächenabstand bestimmt (La Pointe et al. 1997). Das Ergebnis ist eine Verteilungsfunktion aller Abstände der Zellen  $L$  in jeweils x-, y-, und z-Richtung des Modells und kann in einem Histogramm dargestellt werden. Darauf basierend kann der Sigmafaktor  $\sigma$  für jede der Zellen über folgenden Zusammenhang berechnet werden:

$$\sigma = 4 * \left( \left( \frac{1}{L_x} \right)^2 + \left( \frac{1}{L_y} \right)^2 + \left( \frac{1}{L_z} \right)^2 \right) \quad 6.14$$

Zur späteren Berechnung des Fluidflusses wird zusätzlich die Form der Matrixblöcke berechnet. Die einzelnen Komponenten des Sigmafaktors bestimmen hierbei, ob die folgende vorgenommene Idealisierung des Dual-Porosity-Modells durch Würfel (*sugar cubes*), Stäbe (*matchsticks*) oder Platten (*plates*) geschieht. Das Verhältnis der Trennflächenabstände  $L$  in Richtung x, y oder z bestimmt, welche Idealisierung angewendet wird. Ist der Trennflächenabstand in eine der Richtungen relativ groß verglichen mit den andern beiden, so spricht man von einer Idealisierung der Matrixblöcke als Stäbe. Ein geringer Trennflächenabstand verglichen mit den zwei anderen gemessenen Werten führt zu einer Annahme von Platten, eine gleichmäßige Abstandsverteilung in alle drei Richtungen führt zu idealisierten Würfeln.

### 6.5.3 Aufskalieren geomechanischer Parameter

Mit Fracman ist es möglich geomechanische Parameter wie das Elastizitätsmodul und die Poissonzahl zu bestimmen, die in geklüfteten Gesteinen direkt von der Beschaffenheit der Klüftung abhängt und dabei insbesondere von der Intensität der Klüftung. Hier werden die theoretischen Grundlagen erläutert, die hinter den Berechnungen stecken. Auch die geomechanische Aufskalierung beruht auf der Anwendung der Oda Methode und es müssen Informationen über die Steifigkeit der Klüfte vorliegen. Dies geschieht durch die Bestimmung der Komplianztensoren.

Zunächst wird der *Komplianztensor* (*Compliance Tensor*) der Klüfte und der Matrix berechnet und beide zu einem gemeinsamen Tensor kombiniert (Golder Associates 1999-2015). Das Inverse dieses Komplianztensors  $K$  gibt den Steifigkeitstensor  $C_S$  („Stiffness“) bzw. Elastizitätstensor der Gesteinsmatrix und Klüfte an (Jaeger 2007). Es gilt:

$$K = C_s^{-1} \quad 6.15$$

Der Elastizitätstensor wiederum wird allgemein durch das Hookesche Gesetz definiert. Dieses beschreibt das Materialverhalten bei linear elastischer Verformung von Festkörpern (Jaeger 2007). Das Abbilden anisotroper Verformung über das Hookesche Gesetz lautet:

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl} \varepsilon_{kl} = \frac{1}{s_{ijkl}} \varepsilon_{kl} \quad 6.16$$

Der Parameter  $c$  ist ein Tensor der vierten Stufe und beschreibt die elastische Steifigkeit [Pa],  $s$  ist der elastische Komplianztensor [1/Pa],  $\sigma_{ij}$  der Druck [Pa] und  $\varepsilon_{kl}$  die Verformung (Will 2005). Der beschreibende Komplianztensor setzt sich innerhalb eines geklüfteten Mediums anteilig aus den Komplianztensoren beider Medien (Klüfte  $\Delta s_{ijkl}$  und Gesteinsmatrix  $s_{ijkl}^h$ ) zusammen:

$$s_{ijkl} = s_{ijkl}^h + \Delta s_{ijkl} \quad 6.17$$

Der Komplianztensor der Klüfte lässt sich nun beschreiben als (Schoenberg 1995, Will 2005, Elmo 2010):

$$\Delta s_{ijkl} = \frac{1}{4} (\delta_{ik} \varsigma_{jl} + \delta_{il} \varsigma_{jk} + \delta_{jk} \varsigma_{il} + \delta_{jl} \varsigma_{ik}) + \varrho_{ijkl} \quad 6.18$$

Mit

$$\varsigma_{ij} = \frac{1}{V} \sum_n B_T^{(n)} n_i^{(n)} n_j^{(n)} A_s^{(n)} \quad 6.19$$

Und

$$\varrho_{ijkl} = \frac{1}{V} \sum_n B_T^{(n)} n_i^{(n)} n_j^{(n)} n_k^{(n)} n_l^{(n)} A_s^{(n)} \quad 6.20$$

Hier ist  $B_N$  die Kluft-Normalkomplianz und  $B_T$  die Kluft-Scherkomplianz,  $A_s$  der Flächeninhalt [m<sup>2</sup>] der Kluft,  $n$  sind die Einheitsnormalenvektoren der Klüfte,  $\delta$  der mathematische Kroenecker-Delta und  $V$  das Volumen [m<sup>3</sup>] des Gesteins. Dieser Ansatz baut auf der Methode von Oda auf (Oda 1984), nach der ein genereller Gefüge-Tensor  $F$  der Klüfte durch die Volumendichte (äquivalent zu  $P_{31}$ ) der Klüfte, die Dimension der Klüfte (ihre Größe) und die Orientierung der Kluft definiert ist. Odas Gefügetensor in seiner allgemeinen Form lautet:

$$F = \frac{\pi P_{31}}{4} \int_0^\infty \int_\Omega r^3 n * n \dots * n E(n, r) d\Omega dr \quad 6.21$$

Mit  $E(n, r)$  als Dichtefunktion der Verteilung des Normalenvektors  $n$  und einem Winkel  $\Omega$  der gesamten Einheitskugel.

Die Normal- und Scherkomplianz spiegelt das Inverse der Schersteifigkeit und Normalensteifigkeit der Klüfte wider („shear and normal stiffness of fractures“). Diese beiden Parameter lassen sich über eine Scherwelle, die durch das Medium propagiert wird, bestimmen und berechnen (Hudson 1981,



Sayers 2002). In einem isotropen, aber geklüfteten Medium mit bekanntem Elastizitätsmodul  $E$  und Poissonverhältnis  $\vartheta$  lassen sich für eine Kluft mit dem Radius  $r_a$  die Parameter wie folgt berechnen:

$$B_N = \frac{16(1 - \vartheta^2)r_a}{3\pi E(1 + K_n)} \quad 6.22$$

$$B_T = \frac{32(1 - \vartheta^2)r_a}{3\pi E(2 - \vartheta)(1 + M_f)} \quad 6.23$$

Mit:

$$M_f = \frac{4}{\pi} \left( \frac{i\omega_a \eta_f r_a}{\mu_s u} \right) \left( \frac{1 - \vartheta}{2 - \vartheta} \right) \quad 6.24$$

$$K_n = \frac{2r_a k_k}{\pi u \mu_s} (1 - \vartheta) \quad 6.25$$

Hierbei ist  $k_k$  das Kompressionsmodul und  $\eta_f$  die Viskosität des Fluids in der Kluft,  $\omega_a$  die angulare Frequenz der durchgehenden Scherwelle,  $r_a/u$  das Achsenverhältnis der Kluft und  $\mu_s$  das Schermodul. Allgemein beschreibt  $M_f$  den Effekt der Fluidviskosität auf die Scherkomplianz  $B_T$  und  $K_n$  den Einfluss des Kompressionsmoduls auf die Normalkomplianz der Kluft (Sayers 2002).

Sowohl die Schersteifigkeit als auch die Normalensteifigkeit müssen als Eigenschaft (Property) jeder Kluftschar des DFN Modells zugeordnet werden. Ebenso werden während des Aufskalierungsprozesses für die Gesteinsmatrix ein Elastizitätsmodul und eine Poissonzahl angegeben. Die Gesteinsmatrix wird hierbei als isotrop angesehen (Golder Associates 1999-2015). Diese 4 Werte lassen eine Berechnung der Anteile des Komplianztensors der Klüfte und der Matrix zu.

Definiert ist die Normalsteifigkeit  $K_n$  einer Kluft als das Verhältnis des Normalenstress' zum Normalenversatz einer Kluft, die Schersteifigkeit  $K_s$  als das Verhältnis aus Scherstress und Scherversatz (Melin 2012):

$$K_n = \frac{\sigma'_n}{\Delta u_n} \quad 6.26$$

$$K_s = \frac{\tau}{\Delta u_s} \quad 6.27$$

Mit  $\Delta u_n$  als relativem Versatz unter der Normalspannung  $\sigma'_n$  und  $\Delta u_s$  als relativem Versatz unter der Scherpannung  $\tau$ .

Weiterhin kann die Symmetrie, derer die Berechnung der Tensoren folgen soll, bestimmt werden. Diese Festlegung beeinflusst direkt die Eigenschaften, die aus den Steifigkeitstensoren berechnet werden (Golder Associates 1999-2015). Die Wahl einer anisotropen Symmetrie führt direkt zu einer Berechnung aller 21 Komponenten des Tensors. Diese Methode ist somit auch die genaueste Annäherung an den originalen Steifigkeitstensor. Eine Simplifizierung der Symmetrie führt zu einer Reduzierung der ausgegebenen Ergebnisse, da weniger Eigenschaften notwendig werden, die die Annäherung im Raster definieren. So liefert eine angenommene isotrope Symmetrie nur zwei Werte, die isotrope Poissonzahl und das isotrope Elastizitätsmodul aus Gesteinsmatrix und Klüften. Bei einer vertikal-transversalen Isotropie (VTI) werden 5 Eigenschaften berechnet, nämlich das longitudinale und transversale Elastizitätsmodul, das Schermodul und die Poissonzahl in xy- und xz-Richtung.

Der Elastizitätsmodul eines Gebirges mit Trennflächengefüge  $E_G$  lässt sich aus dem E-Modul der Gesteinsmatrix  $E$  und dem E-Modul  $E_T$  der Klüfte berechnen. Eine wichtige Rolle spielt dabei die Intensität der Klüftung  $P_{10}$  (TU Graz 2007).

$$E_G = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{1}{\frac{1}{E} + \frac{P_{10}}{E_T}} \quad 6.28$$

Analog dazu gilt unter Einbeziehung der Normalsteifigkeit der Klüfte  $K_n$  (nach Barton 1972):

$$\frac{1}{E_G} = \frac{1}{E} + \frac{1}{\frac{K_n}{P_{10}}} \quad 6.29$$

Daraus ergibt sich, dass sowohl die Normalsteifigkeit  $K_n$  der Klüfte als auch die Schersteifigkeit  $K_s$  aus den Elastizitätsmodulen ( $K$  und  $E_G$ ) bzw. den Schermodulen ( $G$  und  $G_G$ ) der Matrix und des gesamten Gebirgskörpers berechnet werden können (Barton 1972):

$$K_n = \frac{E * E_G}{\frac{1}{P_{10}}(E - E_G)} \quad 6.30$$

$$K_s = \frac{G * G_G}{\frac{1}{P_{10}}(G - G_G)} \quad 6.31$$

Die Gleichungen 6.28-6.31 offenbaren die direkte Abhängigkeit der Module von der Intensität der Klüftung.

#### 6.5.4 Block K – Dynamisches Aufskalieren

Neben der Nutzung der Oda Methode zur Berechnung der Permeabilität, kann auch ein dynamisches Aufskalieren genutzt werden. Dieser „Block K“ Algorithmus berechnet den Permeabilitätstensor über die Lösung des Gleichgewichtszustandes des Fluidflusses für jede einzelne Rasterzelle. Dieser Gleichgewichtszustand wird berechnet, indem jeder Zelle ein Einheitsdruckgradient zugeordnet wird. Der Druckgradient wird für alle 3 Raumrichtungen innerhalb der Zelle bestimmt und darüber der Gleichgewichtszustand des Fluidflusses entlang der Rasterzellen ermittelt. (Golder Associates 2015). Die Invertierung der resultierenden Zellendurchflüsse ergeben die hydraulischen Leitfähigkeiten (bzw. Permeabilitäten) der Blöcke,  $K_{xx}$ ,  $K_{yy}$  und  $K_{zz}$ .

Die Berechnungen des Algorithmus basieren auf einer allgemeinen Form des Darcy Gesetzes (Golder Associates 2015, Nelson 2001, Zoback 2007, Singhal und Gupta 2010, Klimczak et al. 2010, Lee und Farmer 1993). Demnach gilt für die hydraulischen Leitfähigkeiten in eine Raumrichtung:

$$k = \frac{q\mu L}{A_z \Delta p} \quad 6.32$$

Hierbei ist  $A_z$  die Fläche einer Zellwand in der für die Berechnungen gewählten Raumrichtung [ $m^2$ ],  $\Delta p$  der Druckgradient [Pa], der jeder Zelle zugeordnet wird,  $\mu$  die Viskosität des Fluids [Pa s],  $q$  die Durchflussrate [ $m^3/s$ ] und  $L$  die Länge der Rasterzellen [m].

## 6.6 Das DFN Modell von Eberstadt

Als Beispieldatensatz für eine DFN Modellierung fungieren die aufgenommenen terrestrischen Laserscans des Steinbruchs Eberstadt. Mithilfe der in den vorangegangenen Kapiteln (Kapitel 5) vorgestellten Arbeitsmethoden werden die Trennflächenparameter Orientierung, Länge und Intensität bestimmt.

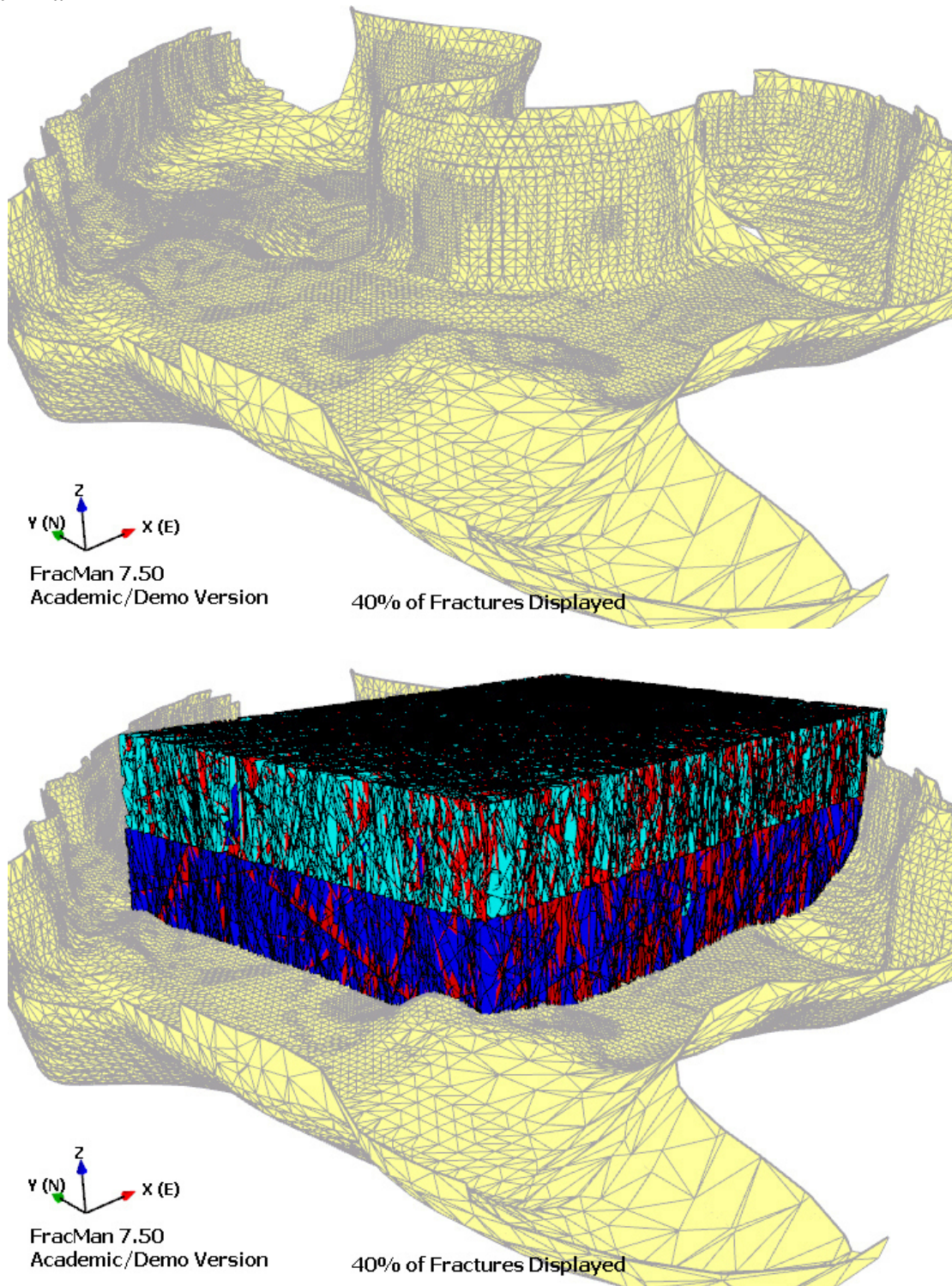


Abbildung 6.8 Aus der Punktwolke erstelltes digitales Höhenmodell (oben) und das darin erstellte DFN Modell aus den quantifizierten Trennflächenparametern, aufgeteilt in 2 Bereiche (oben türkis/rot, unten blau/rot) für die weitere Berechnung hydraulischer und geomechanischer Kenngrößen.

Aus der Punktwolke wird zusätzlich ein digitales Höhenmodell über eine Triangulation erzeugt (Kapitel 3.3.4), das die Ausmaße und Beschaffenheit des Steinbruchs im DFN Modell abbildet.



Dieser Schritt erleichtert eine Abschätzung der Größenverhältnisse des Steinbruchs und der Größe des zu erstellenden DFN Modells, das den mittleren Pfeiler repräsentieren soll (Abbildung 6.8).

### 6.6.1 Quantifizierte Inputparameter des DFN Modells

Um ein „Discrete Fracture Network“ Modell für den Steinbruch Eberstadt zu erstellen, sind verschiedene Eingangsparameter notwendig. Eine genaue Auflistung der Parameter für die Modellerstellung in Fracman ist in Kapitel 6.3.3 zu finden. Um der Geologie des Steinbruchs gerecht zu werden (Kapitel 4.1.3), wird das Modell in einen oberen Bereich A und einen unteren Bereich B unterteilt (Abbildung 6.10). Der Bereich A stellt hierbei die teilweise dolomitisierten Kalksteine und tonreicheren Mergel des mittleren Muschelkalks dar, während B die mächtigeren Wellenkalke markiert, die 2fach durch eine oolithische Bank geringer Mächtigkeit durchzogen sind.

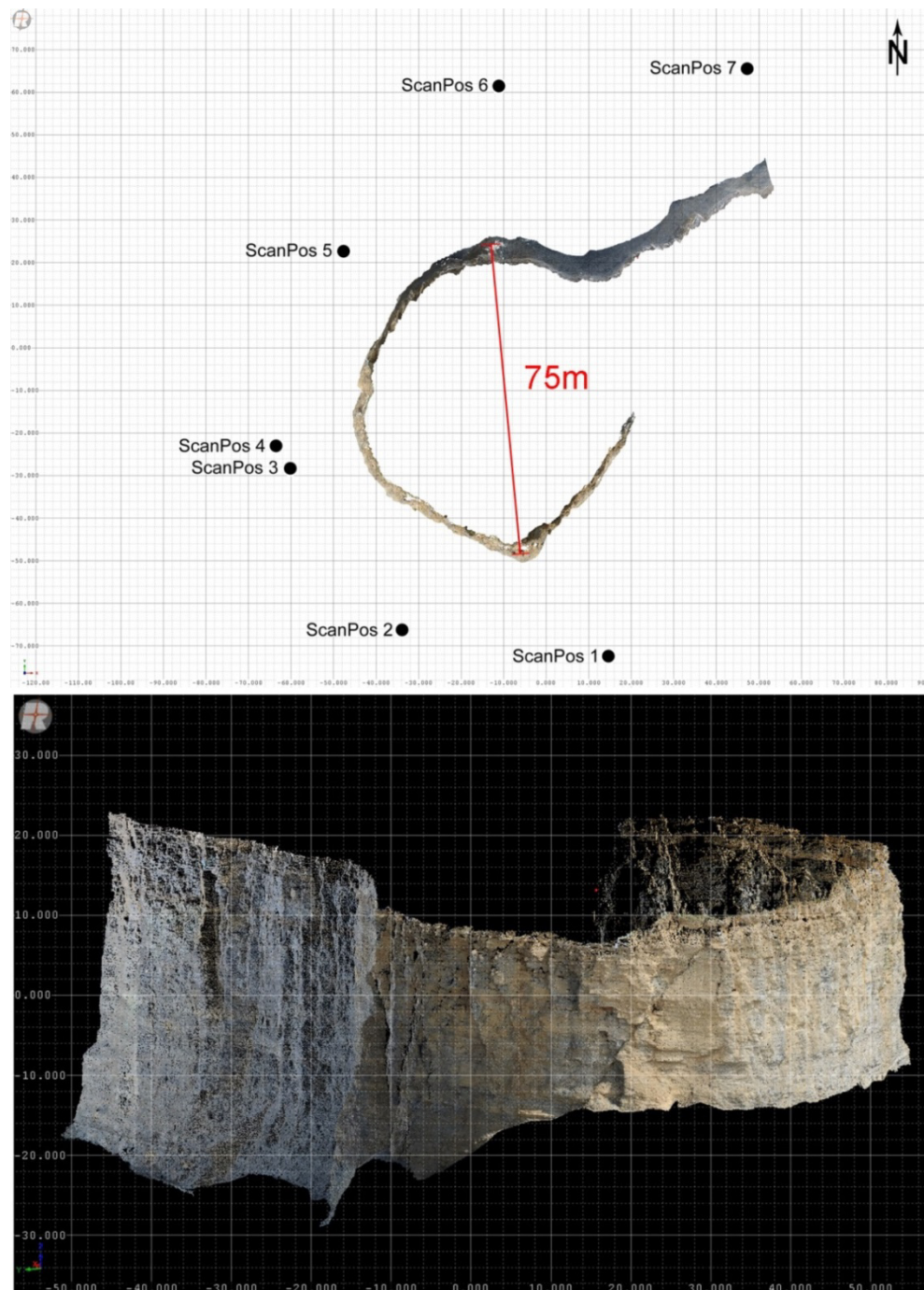
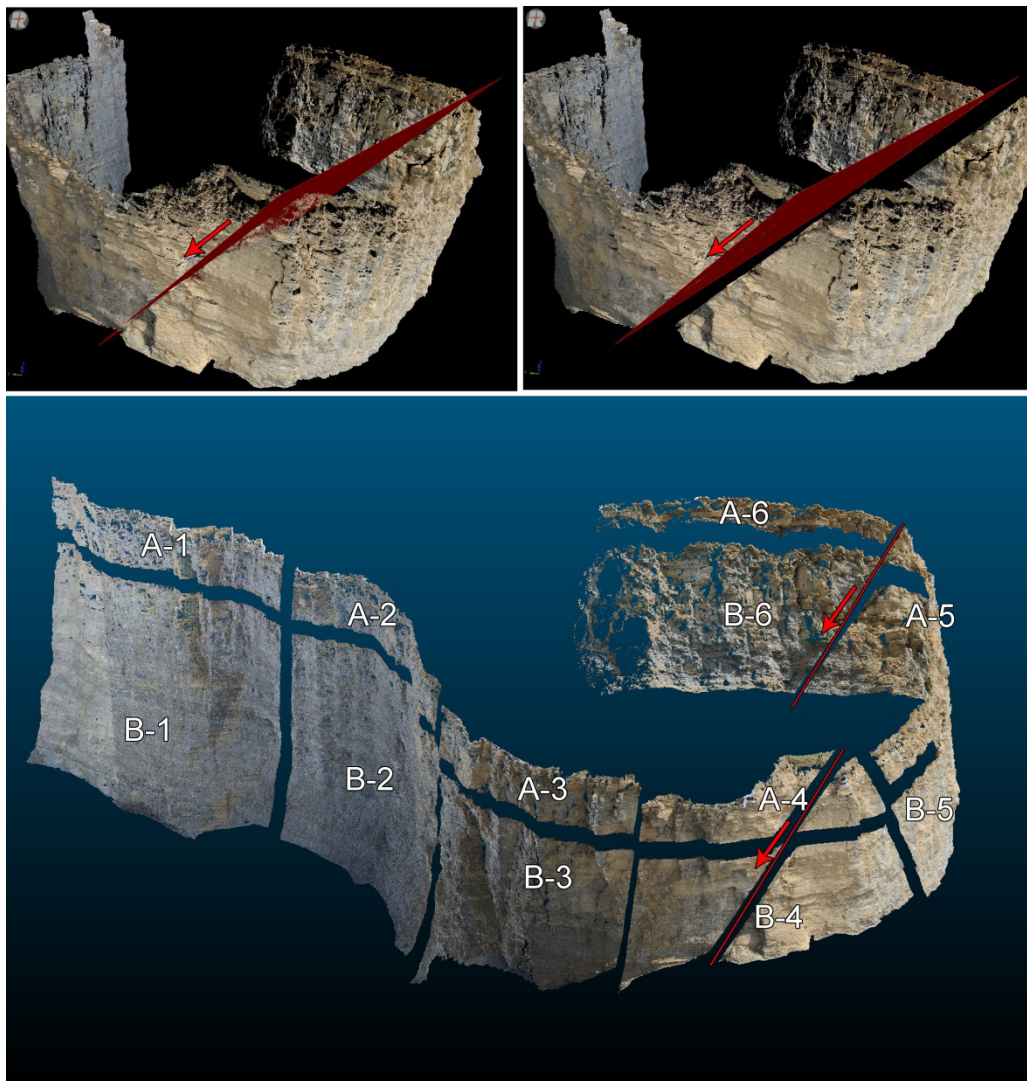


Abbildung 6.9 Ausmaße des Steinbruchs Eberstadt dargestellt an der erstellten Punktwolke aus insgesamt 7 Scanpositionen (Bild oben). Die säulenartige Aufschlussstruktur hat einen Durchmesser von ungefähr 75 Metern.

Unten ist eine Frontalansicht visualisiert. Die Punktwolke ist in RGB-Farben visualisiert. Die Höhe der Struktur beträgt 25 Meter an der niedrigsten und bis zu 50 Meter an der höchsten Stelle. Die Aufschlusswand ist bereits von Vegetation und umliegenden Geh- und Fahrbereichen bereinigt.

Zentral innerhalb des Steinbruchs befindet sich eine sockelartige Felsformation, die annähernd die Form eines Zylinders aufweist (Abbildung 6.9). So ist es möglich, das Trennflächen- bzw. Kluftnetzwerk aus nahezu jeder Himmelsrichtung zu analysieren. Zur Erstellung der Punktwolke mithilfe des terrestrischen Laserscanners werden 7 Aufstellpositionen bestimmt, um Schattenbereiche zu vermindern (Abbildung 6.9 oben). Der Abstand zum Zielobjekt wurde möglichst gleichmäßig gewählt und die Geräteeinstellungen für alle 7 Scanpositionen gleich verwendet. Da die Datenmenge auch nach der Bereinigung der sieben Punktwolken noch immens ist, wird ein Octree-Filter angewendet. Aus Letzterem resultiert eine reduzierte Punktwolke, die sich für die nachfolgenden Bearbeitungsschritte besser eignet und einen durchschnittlichen Punktabstand von 0,025 m aufweist (siehe

Tabelle 4.4).



**Abbildung 6.10** Aufteilung der bereinigten Punktwolke des Steinbruchs Eberstadt. Eine große Abschiebung liegt zentral inmitten des Gesteinskörpers (oben). Neben der horizontalen Aufteilung in einen oberen Bereich A und unteren Bereich B erfolgt eine vertikale Einteilung in 6 weitere Teilbereiche (unten).

Bei der Analyse der Kluftparameter aus der Punktwolke wird diese in insgesamt 12 Bereiche unterteilt. Zum einen in die bereits erwähnte Untergliederung in einen oberen Bereich A und unteren Bereich B, der die unterschiedlichen Lithologien berücksichtigt, zum anderen in eine vertikale in jeweils 6 Bereiche (Abbildung 6.10 unten). So sollen mögliche Änderungen der Kluftparameter

festgestellt werden, die aufgrund der Distanz zur identifizierten Abschiebung (Abbildung 6.10 oben) oder aufgrund des relativen Winkels zwischen Aufschlusswand und Kluftnetzwerk auftreten. Alle Bearbeitungsschritte zur Ermittlung der Orientierung und Größe der Klüfte, sowie der Intensität der Klüftung, werden für jeden der 12 Bereiche einzeln durchgeführt.

### **Orientierung**

Die Auswertung der Orientierungswerte erfolgt nach den in Kapitel 5.1 beschriebenen Arbeitsschritten. Um bei der Berechnung der Normalvektoren die teilweise stark-verwitterten und unebenen Kluftflächen identifizieren zu können, wird die Toleranz der Rauigkeit auf einen Wert von 0,008 m gesetzt. Der niedrige Wert soll eine zufällige Identifizierung von Flächen, die nicht explizit Kluftflächen darstellen, verhindern. Um auch relativ kleine Kluftflächen erkennen zu können, wird die Würfelgröße des Algorithmus auf 0,256 m gesetzt. Passend dazu wird die minimale Anzahl an Flächenpunkten auf 20 festgelegt (Tabelle 6.5). Diese Parameterwahl soll garantieren, dass kleinräumige Klüfte identifiziert werden, gleichzeitig aber sonstige, unebene Flächen nicht mit in die Analyse hineinfließen. Die Wahl der minimalen Flächenpunkte soll zudem der Auflösung der Punktwolke entsprechen.

**Tabelle 6.5** Gewählte Einstellungen des „Plane Patch Filters“ in RiSCAN Pro zur Identifizierung der Flächennormalen im Steinbruch Eberstadt.

Parameter	Gewählte Größe
Würfelgröße	0,256 m
Mindestanzahl Punkte	20
Maximaler Flächenfehler	0,008 m

Die resultierenden Normalvektoren werden einer k-means Clusteranalyse unterzogen. Die Analyse erfolgt für jeden der 12 Teilbereiche einzeln. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.6 aufgelistet und als Stereoplot in Abbildung 6.11 dargestellt. Im Zuge der Clusteranalysen werden 4 Scharen unterschiedlicher Orientierung ausgemacht.

Bei den identifizierten Scharen 1 und 2 handelt es sich um die beiden Hauptklufrichtungen in der Gesteinsformation, die nahezu saiger stehen und nach NNE-SSW (1) und WNW-ESE (2) einfallen. Die dritte, fast horizontale Schar 3 wird als Schichtung identifiziert, die im Mittel flach nach SE einfällt. Im Gegensatz zur Klüftung, die eine messbare Apertur aufweist, wird die Schichtung als hydraulisch inaktiv betrachtet. Bereits in Kapitel 6.4.5 wird dargelegt, inwiefern die Schar 4 einzuschätzen ist. Es handelt sich hierbei nicht um eine Kluftschar, sondern um Schuttbereiche an der Front des Steinbruchs, die während und nach dem Abbau entstanden. Diese türmen sich entlang der Kluftschar 2 auf und werden daher nicht weiter berücksichtigt.

**Tabelle 6.6** Ergebnisse der Parametrisierung der Orientierung (Orient.) der Klüfte und der Intensität (Int.) der Klüftung ( $P_{10}$ ). Dargestellt sind die Clusterzentren und die durchschnittliche Intensität von 4 Trennflächenscharen der einzelnen Teilbereiche.

	Schar 1		Schar 2		Schar 3		Schar 4	
Ebene	Orient.	Int.	Orient.	Int.	Orient.	Int.	Orient.	Int.
A-1	017/85	1.71	296/80	1.77	128/04	2.66		
A-2	012/89	1.67	295/87	2.32	175/21	2.61		
A-3	011/86	1.47	289/85	2.55	219/02	2.58		
A-4	023/85	1.69	287/87	2.3			257/43	-
A-5	200/85	1.18	292/78	1.93				
A-6	195/89	1.4	298/84	2.67	321/08	2.6		
A	016/88	1.52±0.2	293/85	2.26±0.3	185/04	2.6±0.03	257/43	-
B-1	357/88	0.43	303/85	0.7				
B-2	008/87	0.89	309/88	1.18				



B-3	007/87	1.17	29385	1.75	128/12	1.14	309/44	-
B-4	210/86	1.99	287/85	2.45	271/04	1.12	274/57	-
B-5	020/88	1.35	273/82					
B-6	173/89	1.44	300/89					
B	009/89	1.2±0.5	294/86	1.5±1.1	145/04	1.1±0.01	290/49	-

Die Ergebnisse in der Orientierung weisen - wie auch Abbildung 6.11 verdeutlicht - einen Schwankungsbereich auf. Sie liegen alle im Rahmen des natürlichen Schwankungsbereiches bei natürlich geklüfteten Felsgesteinen. Sowohl im Bereich A als auch im Bereich B sind diese Schwankungen gleichermaßen erkennbar, wobei sie im Bereich B ausgeprägter sind. Das liegt darin begründet, dass der aufgenommene Bereich größer ist und somit insgesamt mehr Möglichkeiten unterschiedlicher Ausprägungen in der Klüftung zulässt. In den Bereichen B-5 und B-6 ist die Schar 2 nicht mehr identifizierbar, was den Aufstellpunkten des Scanners geschuldet ist. Dort liegen die Flächen der Kluftschar 2 im Schattenbereich und lassen sich deswegen vom Laser nicht erfassen. Auch die Schichtung fällt teilweise in Schattenbereiche, da aus einer durchschnittlichen Entfernung von 40 m nicht immer eine horizontale Fläche abgedeckt ist. Die potentielle Erfassung dieser Schichtung ist abhängig von der Höhendifferenz zwischen Aufstellpunkt und horizontaler Fläche. Insgesamt ist sie im Bereich A sichtbarer, da dort die Höhendifferenz am größten ist. Weiterhin ist die Schichtung nicht in allen Bereichen aufgeschlossen. Die Schichtung wird nur als Überhang im Steinbruch entlang der Abbaukante sichtbar. Die beiden Hauptklüftscharen 1 und 2 stehen beinahe 90° zueinander. Diese beiden werden nachfolgend maßgeblich in das DFN Modell des Steinbruchs Eberstadt implementiert werden.

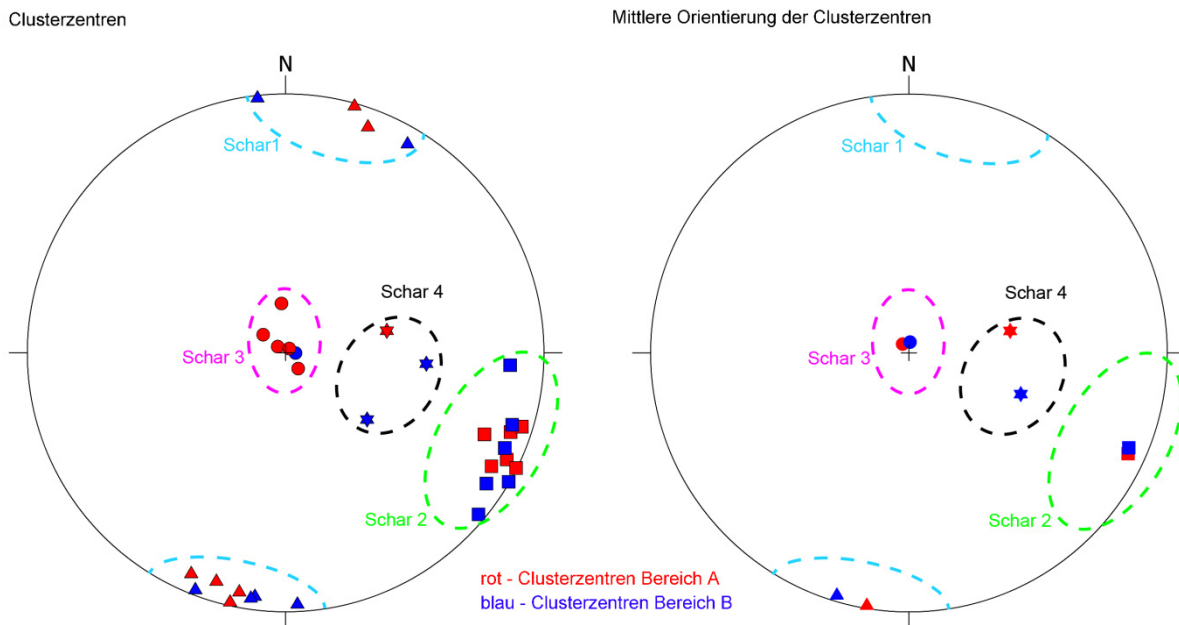


Abbildung 6.11 Ergebnisse der Clusteranalysen mithilfe eines k-means Algorithmus aus den durch die Punktwolke ermittelten Orientierungsdaten. Links sind alle Clusterzentren der 12 Teilbereiche geplotet und durch die Kreise jeweils 4 Scharen zugeordnet. Schar 1 und 2 stellt die Hauptklüftung, Schar 3 die Schichtung und Schar 4 eine Nebenorientierung dar. Rechts sind die mittleren Orientierungen der einzelnen Clusterzentren markiert, die schlussendlich die durchschnittliche Orientierung der Scharen angibt.

Die durchschnittliche Abweichung der Orientierung zwischen Bereich A und B beträgt bei Schar 1 nur 1° für den Einfallswinkel und 7° für die Einfallsrichtung. Bei Schar 2 sind es jeweils nur 1° bei Einfallsrichtung und -winkel.

In Abbildung 6.12 sind die lokalen Variationen der Orientierung als Kluftrosen direkt den Teilbereichen zugeordnet. Auch wenn die Hauptorientierungen gleich bleiben, so ändert sich doch ihre Häufigkeit bzw. Ausprägung. Diese hängt vom relativen Winkel zwischen Kluftnetzwerk und



Aufschlusswand ab. Klufrichtungen, deren Normalvektoren nahezu orthogonal zur Normalrichtung der Aufschlusswand stehen, werden seltener während der Orientierungsauswertung erfasst. Die Schichtung zeigt keinen ganz eindeutigen Trend, wenn man die Teilbereiche einzeln betrachtet. Es handelt sich stets um eine nahezu horizontal verlaufende Trennflächenschar, die im Mittel nach Süden (Bereich A) und SE (Bereich B) einfällt.

### Intensität

Intensitätswerte werden entsprechend dem in Kapitel 5.3 vorgestellten Arbeitsprozess ermittelt. Eine Identifizierung der Flächen im Steinbruch erfolgt mit der Software SplitFX. Das Resultat sind  $P_{10}$  Intensitätswerte für die beiden Hauptklufscharen 1 und 2. Aufgrund der geringen Anzahl an identifizierbaren Flächen für die Schichtung (Schar 3), werden hier die Abstände zwischen den Flächen manuell eingemessen und in den  $P_{10}$  Wert umgerechnet. Die Ergebnisse der Quantifizierung sind in Tabelle 6.6 aufgelistet. Die Intensität der Kluftschar 2 ist durchgehend höher als für Kluftschar 1. Sie liegen im Durchschnitt im Bereich A bei 1,52 (Schar 1) und 2,26 (Schar 2) und im Bereich B bei 1,2 (Schar 1) und 1,5 (Schar 2). Das ist vor allem lithologisch bedingt, da Bereich B aus massiven Wellenkalken besteht und Bereich A auch aus feinkörnigeren Mergeln. Es lässt sich feststellen, dass die Klüftung im Bereich A intensiver ist als im Bereich B. Die der Schichtung entsprechende Schar 3 zeigt deutlich, dass die Schichtung im oberen Bereich A zunimmt. Dies stimmt gut überein mit der lithologischen Abfolge im Steinbruch.

Zusätzlich ist in Tabelle 6.6 für die mittleren Intensitätswerte ein 95%-Konfidenzintervall angegeben. Für die Schar 2 (Bereich B) liegen Werte von 0,4 bis 2,6 noch innerhalb des Konfidenzintervalls und würden so theoretisch mit den Werten aus Bereich A übereinstimmen. Selbiges gilt für die Schar 1, wo die Werte im Bereich B zwischen 0,7 und 1,7 sowie 1,3 und 1,7 schwanken.

**Tabelle 6.7 Intensitäten  $P_{10}$  und die daraus errechneten Intensitäten  $P_{32}$  der Hauptklüftungen der einzelnen Teilbereiche. Zusätzlich ist der zur Umrechnung benötigte Konzentrationsparameter  $\kappa$  angegeben.**

Ebene	Intensität $P_{10}$			Intensität $P_{32}$			$\kappa$		
	Schar			Schar			Schar		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
A-1	1,71	1,77	2,66	3,18	2,90	4,45	3	1	64
A-2	1,67	2,32	2,61	3,10	4,15	2,10	3	2	64
A-3	1,47	2,55	2,58	2,64	4,27	3,15	2	1	64
A-4	1,69	2,30		3,02	5,03	2,50	2	2	
A-5	1,18	1,93		2,32	3,40	3,12	5	2	
A-6	1,4	2,67	2,60	2,34	4,40	2,03	1	1	64
A	1,52	2,26	2,6	2,77	4,03	2,89	2,67	1,5	64
B-1	0,43	0,70		0,97	1,61		16	16	
B-2	0,89	1,18		2,07	2,80		25	18	
B-3	1,17	1,75	1,14	2,74	3,26		20	3	
B-4	1,99	2,45	1,12	3,34	3,56		3	3	
B-5	1,35			3,03			16		
B-6	1,44			3,23			16		
B	1,2	1,5	1,1	2,56	2,81		16	10	

Innerhalb der Teilbereiche A und B gibt es eine große Schwankung der Intensitätswerte. Diese variiert für den Bereich B, Schar 1, zwischen 0,43 und 1,99 Klüfte pro Meter. Für den Bereich A sind die Schwankungen auch beträchtlich, fallen aber geringer aus. Das kann an der Unterteilung der Teilbereiche und deren daraus resultierenden Größe liegen. Sie sind im Bereich B größer als im Bereich A und bieten so mehr Raum für Variationen. Der ermittelte  $P_{10}$  Wert ist zudem stark abhängig

von der Flächenidentifikation. In den Bereichen B-5 und B-6 konnten für die Schar 2 gar keine Klüfte identifiziert werden.

Die Intensitätswerte sind in Abbildung 6.12 innerhalb des Aufschlusses lokalisiert. Die Intensitätswerte steigen in den Bereichen, die von mehreren Scanpositionen aus erfasst sind und somit nur selten Schattenbereiche aufweisen. In den Randbereichen, wie beispielsweise B-1, sinkt die Intensität rapide ab. Hier konnten nicht alle aufgeschlossenen Kluftflächen vom Laser erkannt werden, was zu einer Abnahme der Intensität führt. Es empfiehlt sich, diese Bereiche bei der Parametrisierung der Kluftintensitäten zu vernachlässigen.

Mithilfe des Konzentrationsparameters  $\kappa$  lassen sich analog zu Kapitel 5.3.2 die  $P_{10}$  Werte in  $P_{32}$  Intensitätswerte umrechnen (Tabelle 6.7). Für die Hauptklüftungen 1 und 2 sind die  $\kappa$ -Werte durchgehend niedrig und offenbaren so eine hohe Streuung der zugehörigen Orientierungswerte. Aufgrund der wenigen verwertbaren Orientierungswerte für die Schichtung werden alle Orientierungswerte zusammengefasst und ein gemeinsamer Wert für  $\kappa$  ermittelt. Dieser liegt bei 64 und ist damit deutlich höher als für die beiden Hauptklüftungen.

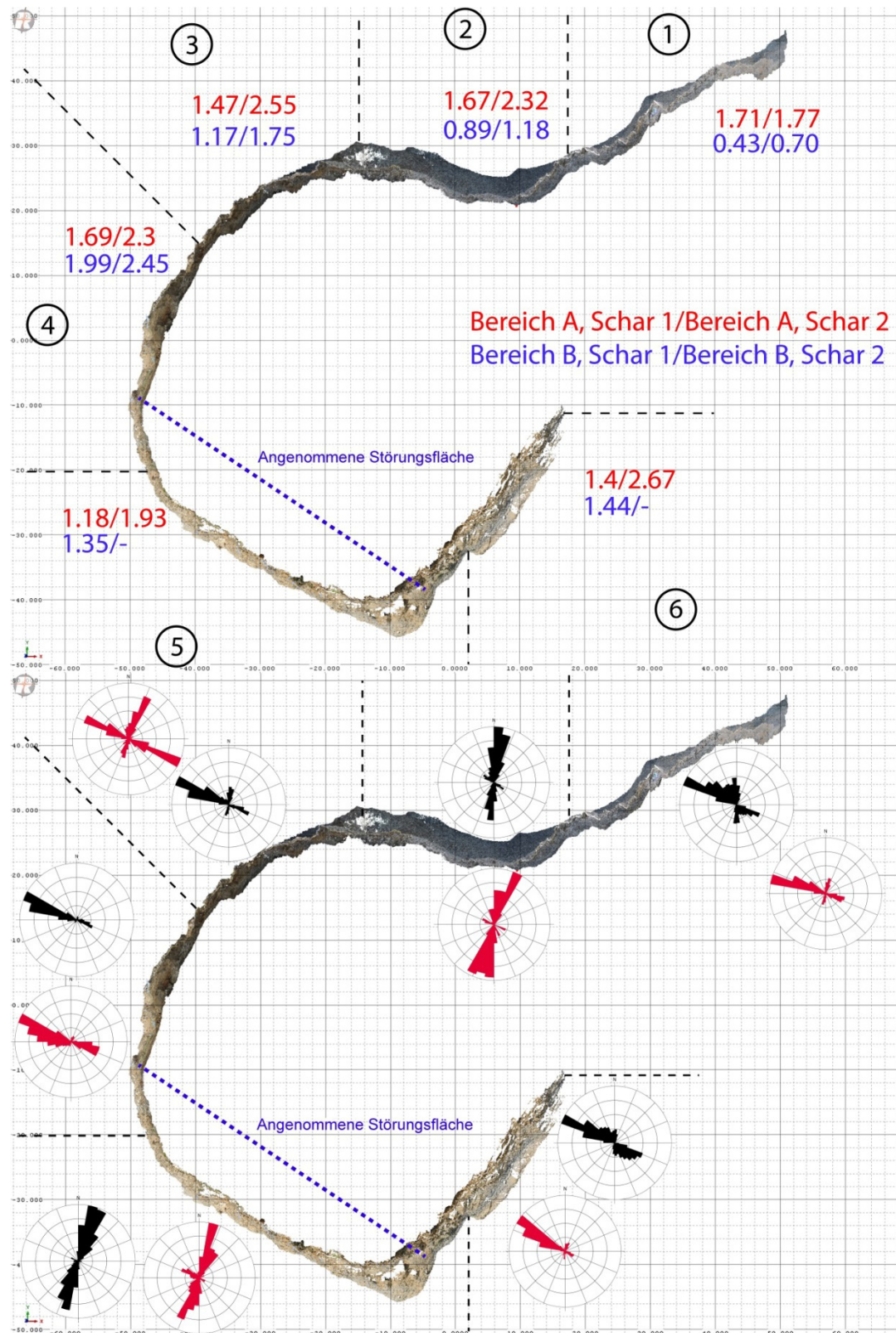


Abbildung 6.12 Lokale Variationen der Kluftparameter entlang der Aufschlusswand. Im oberen Bild sind die Intensitäten  $P_{10}$  der Hauptklüftungen den Teilbereichen zugeordnet. Gerade im Bereich B ist eine hohe Schwankung der Werte zu beobachten, die von Bereich B-1 bis B-4 zunächst zunehmen und danach rapide abnehmen. Die Intensitäten im Bereich A zeigen ein ähnliches Muster, allerdings ist der Schwankungsbereich deutlich geringer. Im unteren Bild ist die Variation der ermittelten Orientierungswerte als Kluftrosen dargestellt. Je nach Winkel der Aufschlusswand relativ zum Kluftnetzwerk ist eine der beiden Hauptklüftungen stärker ausgeprägt.

Direkt gekoppelt an die Intensitätswerte sind die Abstände der Kluftflächen. Jeweils für die Bereiche A und B sowie die Hauptklüftungen 1 und 2 sind die Abstände in einer kumulativen Verteilung in

Abbildung 6.13 dargestellt. Über diese Darstellung ist ein direkter Vergleich der Werte zueinander möglich. Insgesamt gilt, dass weniger als 3% aller Klüfte einen Abstand größer als 10 Meter aufweisen. Über 80% der Klüfte liegen weniger als 5 Meter voneinander entfernt. Der stärkere Anstieg der roten Kurven aus Bereich A weist darauf hin, dass die Abstände hier insgesamt geringer sind als für den Bereich B, was sich natürlich auch mit den berechneten Intensitätswerten deckt. Für den Bereich A weisen somit mehr als 90% der Klüfte Abstände von 5 Metern und weniger auf. Zusätzlich sind die Abstände von Schar 1 geringer als die der Schar 2, was sich ebenfalls mit dem Trend der Intensitätswerte deckt. Im Anhang (11.5) sind die Abstandswerte ebenfalls als Histogramme dargestellt. In jedem Bereich zeigen die Kluftscharen zueinander ähnliche Trends und ihre Verteilung lässt sich am besten über eine Potenzfunktion beschreiben (nach einem Kolmogorow-Smirnow-Test, siehe Kapitel 5.2.2).

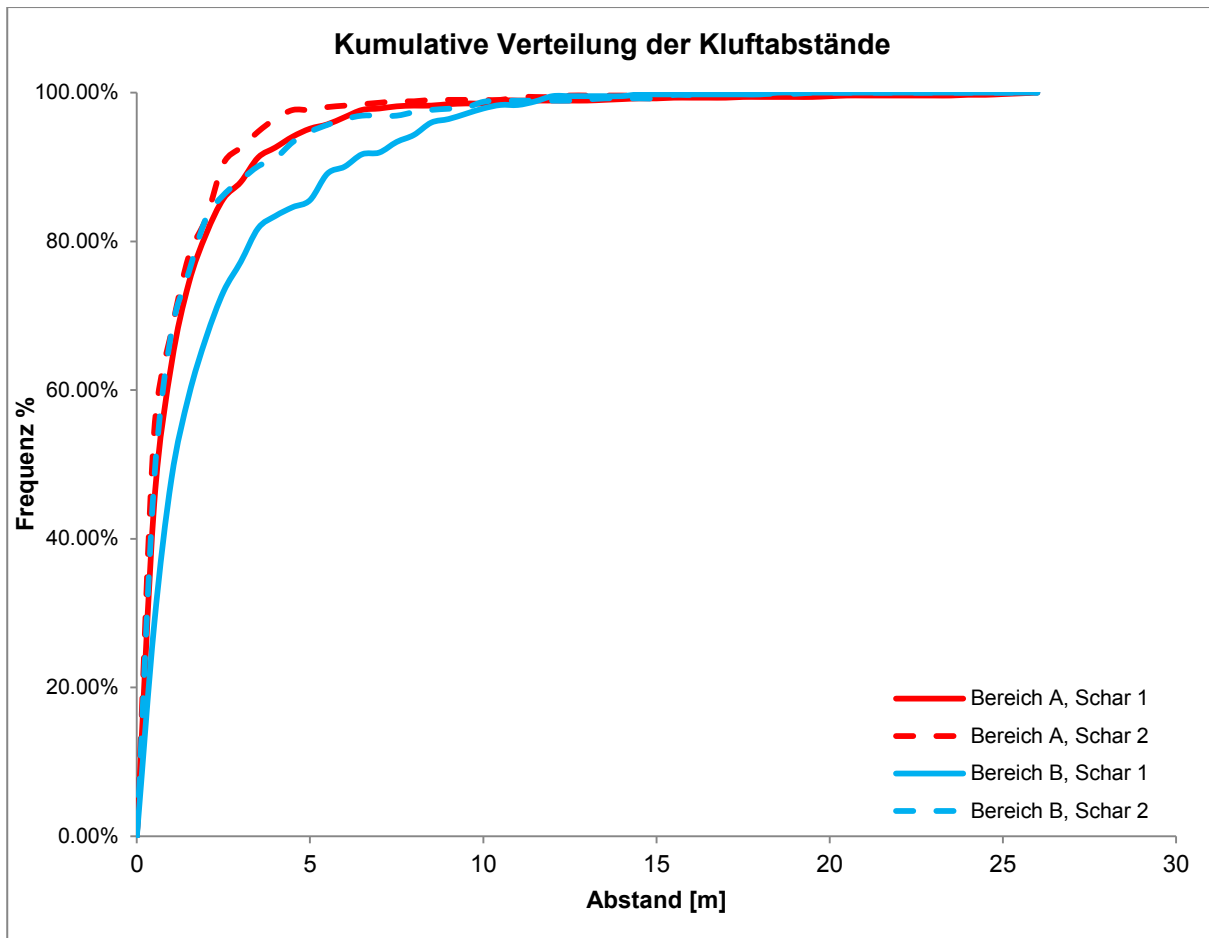


Abbildung 6.13 Kumulative Verteilung der Kluftabstände der Scharen 1 und 2 in den Bereichen A (rot) und B (blau). Der zunächst starke Kurvenanstieg illustriert das hohe Maß an kleinen Abständen. Insgesamt liegen die Abstände der Schar 1 unter der von Schar 2 und der Bereich A weist geringere Abstände als Bereich B auf.

### Größe

Die Größe bzw. Länge der Kluftflächen wird gemäß den in Kapitel 5 vorgestellten Arbeitsschritten ermittelt. Wie bei der Intensität werden auch hier die Flächen genutzt, die mithilfe der Software SplitFX auf Grundlage einer Triangulation identifiziert werden. Für alle 4 Bereiche lässt sich die Verteilung der Größen am besten über eine Potenzfunktion beschreiben (Tabelle 6.8). Die Verteilungen werden auch hier mithilfe des Kolmogorow-Smirnow-Tests ermittelt. Die zugehörigen Histogramme sind im Anhang (Kapitel 11.5) zu finden. Insgesamt zeigen sich für die Längen der Schar 2 höhere Werte bis zu 7 (Bereich B) bzw. 8 Meter (Bereich A), während die Schar 1 nur Maximallängen von 4 (Bereich B) bzw. 5 Meter (Bereich A) aufweist.

Tabelle 6.8 Ergebnisse der statistischen Untersuchung der Kluftlängen.

	Verteilung	$\lambda_w$	$x_{\min}$
A – Schar 1	Potenzfunktion	-1,38	0,4
B – Schar 1	Potenzfunktion	-1,395	0,38
A – Schar 2	Potenzfunktion	-1,41	0,37
B – Schar 2	Potenzfunktion	-1,34	0,4

Mithilfe der kumulativen Verteilungen ist wieder ein direkter Vergleich der Bereiche und Kluftscharen zueinander möglich (Abbildung 6.14). Hier sind kaum Unterschiede zwischen den Längen auszumachen. Lediglich Schar 2 im Bereich A weist um den Längenbereich von 2 Metern eine etwas geringere Steigung auf. Mehr als 90% aller Klüfte haben eine Länge von 1,5 Metern oder weniger und 80% weniger als 1 Meter.

Die in Tabelle 6.8 ermittelten Werte der statistischen Verteilungen können in das DFN Modell integriert werden.

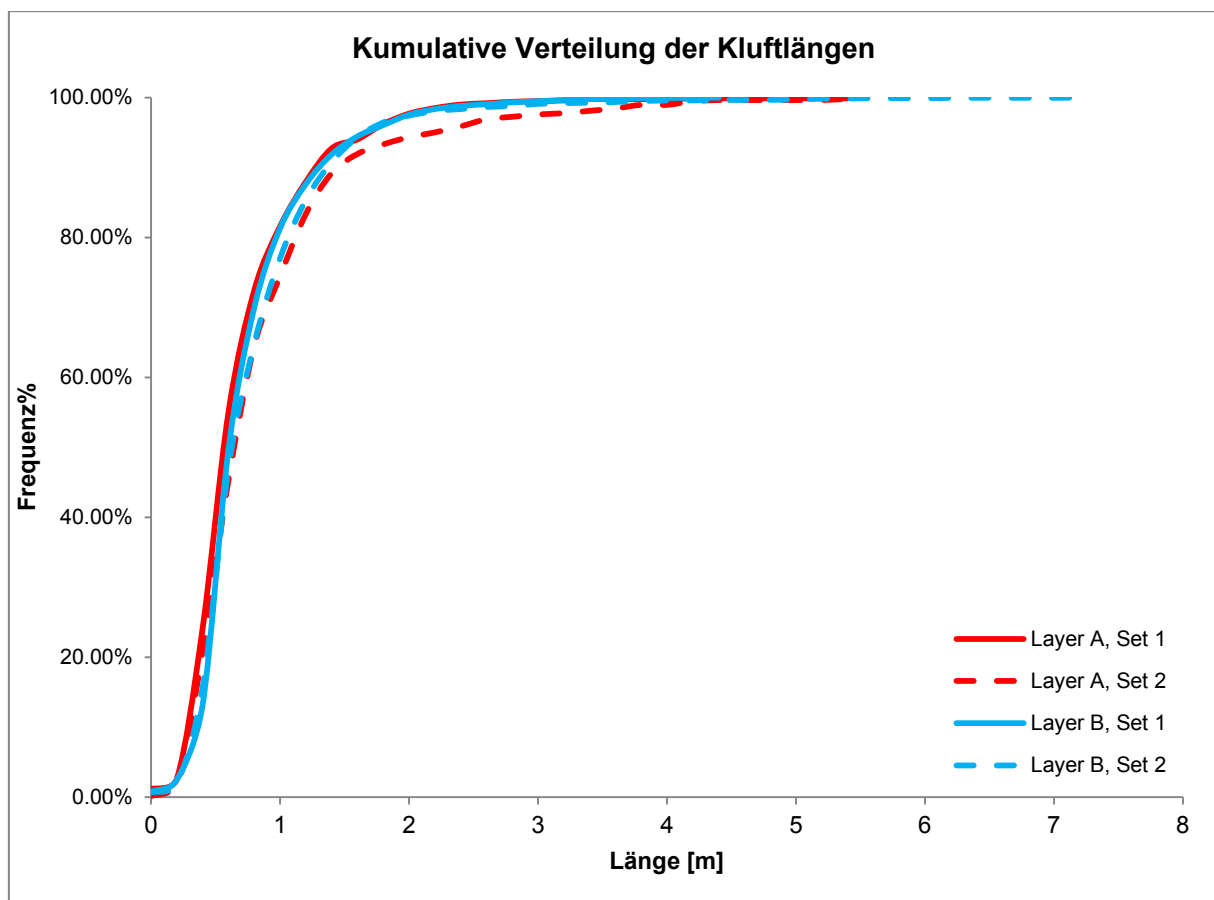


Abbildung 6.14 Kumulative Verteilung der Kluftlängen der Scharen 1 und 2 in den Bereichen A (rot) und B (blau). Der zunächst starke Kurvenanstieg illustriert das hohe Maß an kleinen Kluftlängen. Die 4 Kurven verlaufen nahezu identisch.

Die für die Längen bestimmten statistischen Verteilungen gelten alle erst ab einem Minimalwert ( $x_{\min}$ ) von ca. 0,4 m (Tabelle 6.8). Dieser untere Grenzwert ist auch durch die Ausgangsaufösung der Punktwolke bedingt, die Parameter, die gewählt wurden, um die Punktwolke zu triangulieren, und schlussendlich die gewählten Parameter der Flächenidentifikation. Während der Identifizierung von Flächen auf der triangulierten Punktwolke wird in diesem Beispiel die minimale Anzahl von Dreiecken, die eine Fläche darstellen sollen, auf 8 festgelegt. Die Auflösung der Triangulation entspricht ungefähr 400 Dreiecken pro Quadratmeter, 8 Dreiecke repräsentieren somit eine Fläche von 0,02m<sup>2</sup>. Eine quadratische Kluftfläche vorausgesetzt ergibt sich eine Kantenlänge von 0,14 m für eine identifizierte Kluft. Die untere Grenze der berechenbaren Längen nach unserer Vorgehensweise entspricht dann 0,2m (für die Diagonale der Fläche). Das ist der minimal erkennbare Längenwert für

unser Modell. Aufgrund von Irregularitäten während der Punktwolkenaufnahme, die zu lokalen Bereichen niedrigerer Auflösung als auch zu Löchern innerhalb der triangulierten Oberfläche und zu Schattenbereichen führen können, werden auch Flächen oberhalb dieses 0,2 m Schwellenwertes nicht immer erkannt. In unserem Fall beträgt dieser Wert ungefähr 0,4 m. Auch Sturzenegger und Stead (Sturzenegger und Stead 2009b) spezifizierten in ihrer Studie einen unteren Schwellenwert von 0,2 bis 0,6 m, allerdings nutzten sie für die Auswertung manuelle Analysemethoden, um die Kluftlängen zu quantifizieren.

### 6.6.2 DFN Modelltest in Fracman

Erstellte DFN Modelle eignen sich gut um hydraulische Eigenschaften eines geklüfteten Reservoirs widerzuspiegeln. In einem einfachen Modelltest wird überprüft, ob die Permeabilität beim Aufskalierungsprozess sinnvoll in das EPM Modell übertragen wird. Dazu werden zwei Szenarien anhand des Eberstadt-Datensatzes entwickelt, die sich einzig in der Apertur und damit der Kluftpermeabilität unterscheiden.

Ausgehend von Formel 6.9 besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Apertur, der im Modell erstellten Klüfte, und der daraus resultierenden Permeabilität:

$$k \sim b^2 \quad 6.33$$

Die Permeabilität  $k$  ist demnach proportional zum Quadrat der Apertur  $b$ . Es wird erwartet, dass die Ergebnisse sich nur genau um die Größenordnung unterscheiden, die als Unterschied zwischen den beiden Aperturen in den beiden Ausgangsdatsätzen der Szenarien gewählt werden. Insgesamt werden 3 Kluftscharen (bzw. Trennflächenscharen) aus dem Eberstadtmodell übernommen (Abbildung 6.15). Die Aufteilung in einen oberen und unteren Bereich wird auch hier beibehalten. Neben den bekannten Hauptkluftscharen A-1 und A-2, sowie B-1 und B-2 (Tabelle 6.7) wird auch die hydraulisch nicht relevante Schichtung hinzugefügt und ebenfalls mit hoher Apertur und somit hoher Permeabilität versehen. Das resultierende DFN Modell der Größe 17 m\* 17 m\* 9 m (x\*y\*z) wird auf ein Raster der Größe 30\*30\*16 (i\*j\*k) aufskaliert (siehe Abbildung 6.16 oben).

Szenario (a) bildet alle 3 Kluftscharen mit einer Apertur von 0,01 mm und Szenario (b) mit 1 mm ab. Bis auf die Apertur sind alle Parameter wie Größe, Orientierung und Intensität beider Szenarien konstant gewählt.



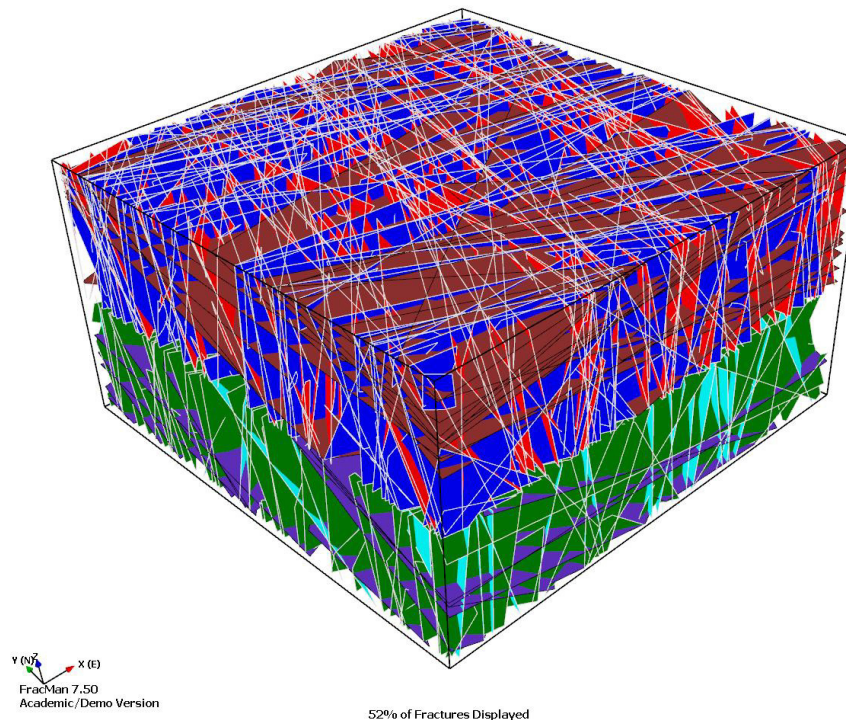


Abbildung 6.15 Erstelltes DFN Modell mit einer Größe von 17\*17\*5 (oben 9?) m ( $x*y*z$ ). Die für den Steinbruch Eberstadt ermittelten Kluftparameter wurden auch für dieses Modell genutzt. Zwei unterschiedliche Szenarien mit 1 mm und 0,01 mm Apertur werden aus diesem Modell kreiert. Im oberen Bereich sind 2 Kluftscharen äquivalent zu den Scharen A-1 (blau) und A-2 (rot) erstellt, im unteren Bereich 2 Scharen äquivalent zu B-1(grün) und B-2 (türkis). Die beiden horizontalen Scharen in dunkelrot und violett stehen für die Schichtung.

Aus Formel 6.9 ergibt sich die Permeabilität zu 8,4 D (a) und 84000 D (b) für jede Kluft des Modells. Die Ergebnisse der Permeabilitätsberechnungen nach der Oda Methode (Kapitel 6.5.1) auf Grundlage des Kluftnetzwerks sind in Abbildung 6.16 und Tabelle 6.9 aufgeführt.

Tabelle 6.9 Ergebnisse der beiden Modelle unterschiedlicher Apertur. Gelistet sind Permeabilitätswerte für 6 unterschiedliche Raumrichtungen (xx, yy, zz, xy, yz und zx). Die Permeabilitätswerte für den Fall b sind gegenüber Fall a um den Faktor 10000 erhöht, unabhängig von der gewählten Richtung.

	a	b
<b>Apertur</b>	0,01 mm	1 mm
<b>K<sub>xx</sub> [md]</b>	162,9	$1,6*10^6$
<b>K<sub>yy</sub> [md]</b>	150,4	$1,5*10^6$
<b>K<sub>zz</sub> [md]</b>	42,0	$4,1*10^5$
<b>K<sub>xy</sub> [md]</b>	47,2	$4,7*10^5$
<b>K<sub>yz</sub> [md]</b>	5,4	$5,4*10^4$
<b>K<sub>zx</sub> [md]</b>	-2,5	$-2,5*10^4$

Der Vergleich der Ergebnisse der Komponenten des Permeabilitätstensors  $k$  zeigt, dass der quadratische Zusammenhang exakt widerspiegelt wird. Eine Erhöhung der Apertur um 2 bzw. 4 Größenordnungen bei der Kluftpermeabilität präsentiert sich durchgehend in allen Komponenten des resultierenden Permeabilitätstensors. Nicht nur die absoluten Werte sondern auch das EPM Modell (Abbildung 6.16) zeigen die gleiche Permeabilitätsverteilung und bestätigen, dass einzig die Geometrie des Kluftnetzwerks, die für beide Szenarien identisch ist, ausschlaggebend für die Ergebnisse ist. Ebenso sind auch die Form der Verteilung und der Schwankungsbereich der Permeabilitätswerte identisch und nur im Bereich von 4 Größenordnungen zueinander versetzt (Abbildung 6.16 unten). Entgegen dem eigentlichen hydraulischen Modell des Steinbruchs Eberstadt wird hier auch die Schichtung mit in das Modell übernommen und testweise als hydraulisch relevant angesehen. So wird verdeutlicht, wie stark die horizontale Schichtung Einfluss auf die Permeabilität in

horizontaler Richtung hat. Entlang der in Abbildung 6.16 dargestellten Permeabilität in  $k_{xx}$ -Richtung ist dieses Phänomen stark zu erkennen. Dies ist auch dadurch bedingt, dass die Schichtungsflächen sehr viel größer sind als die Hauptklüfte. Das Beispiel zeigt, wie stark die reine Kluftgeometrie und deren Ausrichtung die richtungsabhängige Permeabilität maßgeblich beeinflussen. Im Endeffekt belegen die beiden Szenarien die Stetigkeit der Modelle während des Aufskalierungsprozesses.

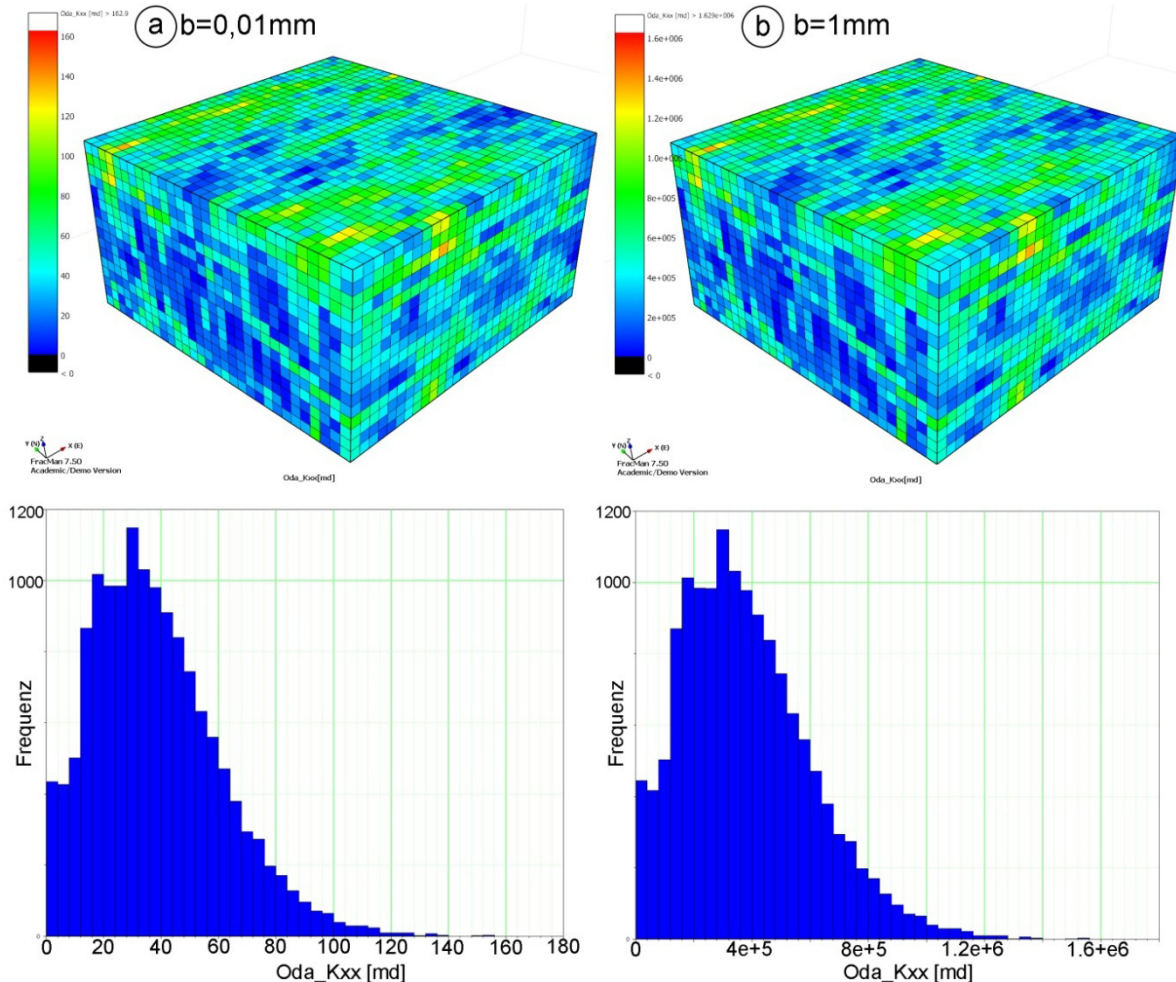


Abbildung 6.16 Vergleich der Unterschiede in der Permeabilität in  $xx$ -Richtung ( $k_{xx}$ ) bei der Wahl unterschiedlicher Ausgangspermeabilitäten. Die  $xx$ -Richtung wird repräsentativ gewählt und diese Ergebnisse lassen sich gleichwertig auf alle Richtungen übertragen. Die Verteilung der Permeabilität im Raum wird durch die Apertur nicht beeinflusst, sondern nur ihr absoluter Wert. Dieser unterscheidet sich bei einer Erhöhung der Permeabilität um den Faktor 100 (von 0,01 mm auf 1 mm) um das 10000-fache. Links (Fall a) und rechts (Fall b) sind die Permeabilitätswerte verteilt im Raster und aufgeführt im Histogramm zu sehen. Diese Verteilungen sind identisch und schwanken für den Fall a zwischen 0 und 160 md und für Fall b zwischen 0 und  $1,6 \cdot 10^6$  md.

### 6.6.3 Hydraulische Berechnungen aus dem DFN Modell Eberstadt

Aus dem DFN Modell des Steinbruchs Eberstadt können hydraulische Parameter aufskaliert werden. So leiten sich Informationen über die Permeabilitäten in verschiedene Raumrichtung aus der Oda Methode (vergleiche Kapitel 6.5.1) ab. Informationen der Raumlage, Apertur, Kompressibilität und Häufigkeit der Klüfte sind für diese Berechnungen ausreichend.

In diesem Modell liegen die Aperturen konstant bei 0,01 mm und die Kompressibilitäten bei  $6 \cdot 10^{-8}$  Pa ( $10^{-5}$  1/psi). Der Wert für die Apertur und Kompressibilität werden nach gesammelten Literaturwerten aus Nelson 2001, Tiab et al. 2006 und Bahrami et al. 2012 für Karbonate gewählt, da keine Daten aus dem Steinbruch selbst verfügbar sind.

Scherklüfte (Mode II und III) sind in Reservoiren diejenigen Klüfte, die den Fluidfluss signifikant erhöhen. Die Apertur kann in der Regel mit 0,01 mm abgeschätzt werden. Extensionsklüfte (Mode I) tragen nur gering zum Fluidfluss in natürlichen Reservoiren bei. Aufgrund der Tiefe und den dort anzunehmenden Stresszuständen weisen die Extensionsklüfte eine sehr geringe bis nicht vorhandene

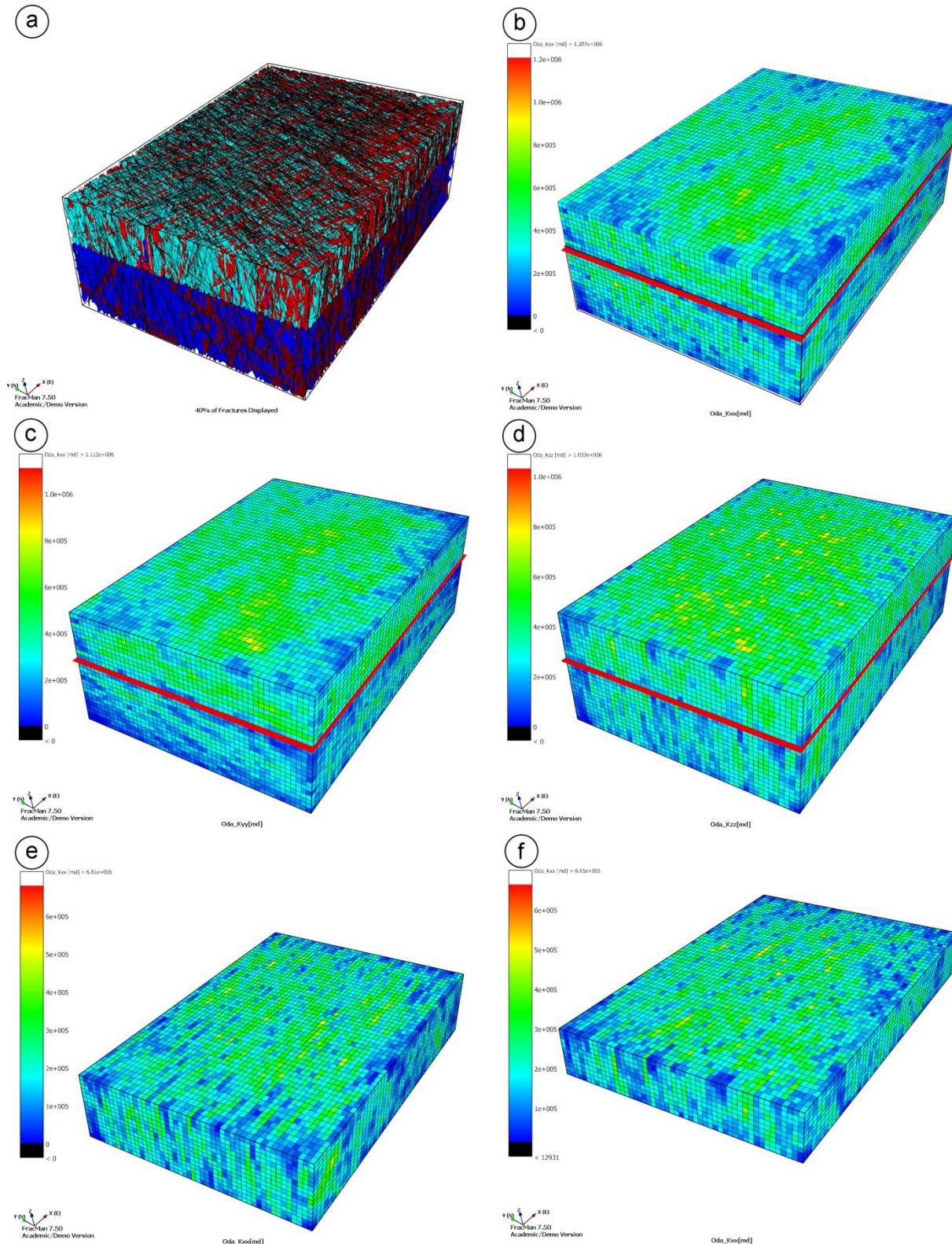
Apertur auf, die vor allem durch natürliche Unebenheiten der Kluftoberfläche vorgegeben ist (Zoback 2007). Daher werden für die hydraulischen Berechnungen am Steinbruch Eberstadt nur die beiden Hauptklufrichtungen berücksichtigt, die als Scherklüfte hydraulisch aktiv definiert werden. Die Schichtung hingegen wird bei dieser Betrachtung vernachlässigt. Das erstellte Kluftnetzwerk hat eine maximale Ausdehnung, die dem mittigen Pfeiler des Steinbruchs entspricht. Unterschieden wird bei den Berechnungen zwischen den unterschiedlichen Kluftnetzwerken im oberen und unteren Bereich des Steinbruchs.

Die hier benutzte Oda Methode hat den Vorteil, dass sie keine komplette Simulation des Fluidflusses benötigt. Die Quantifizierung beruht auf Anzahl, Richtung und Apertur von Klüften innerhalb einer Rasterzelle. Allerdings berücksichtigt die Methode weder die Größe der Klüfte noch deren Konnektivität über ihre Lokation, so dass diese Methode auf sehr gut miteinander verbundene Kluftnetzwerke beschränkt ist (FracMan® Fractured Reservoir Analysis & Modelling 2013). Die Methode erlaubt die Berechnung der gesamten Permeabilität aus Klüften und Gesteinsmatrix, die Permeabilitätswerte der Matrix werden in der jeweiligen Rasterzelle auf die Permeabilität der Klüfte addiert. Eine Erweiterung der Oda Methode stellt die Oda Gold Methode dar. Diese Methode führt zusätzlich einen Konnektivitätscheck in jeder Rasterzelle durch und sortiert alle Klüfte aus, die nicht Teil einer zusammenhängenden Kluftwegsamkeit sind (Golder Associates 2014, 2015, 1999-2015).

In dem Modell wird auf das Hinzufügen einer Matrixpermeabilität verzichtet, da einzig die durch Klüfte induzierte Permeabilität betrachtet werden soll.

Zunächst werden die Permeabilitäten nach der Oda Methode berechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.17 vorgestellt. Über das fertige DFN Modell des Steinbruchs wird ein Raster der Größe 150\*100\*50 Metern mit 50\*50\*25 Rasterzellen gelegt, die beiden zu unterscheidenden Bereiche oben (A) und unten (B) werden durch eine rote Fläche voneinander optisch getrennt (Abbildung 6.17 a und b). Die Permeabilitäten in den 3 Raumrichtungen sind visuell durch das Einfärben der Rasterzelle nach ihrem Permeabilitätswert dargestellt. Die Berechnung erfolgt für die Parameter in horizontaler x-, horizontaler y- und vertikaler z-Richtung ( $K_{xx}$ ,  $K_{yy}$  und  $K_{zz}$ ).





**Abbildung 6.17** Ergebnisse des Aufskalierungsprozesses nach Oda für das DFN Modell des Steinbruchs Eberstadt. Aus dem ursprünglichen DFN Modell (a) werden unter anderem die Permeabilität  $K_{xx}$  (b),  $K_{yy}$  (c) und  $K_{zz}$  (d) visualisiert. Die rote Fläche stellt die Grenze des lithologischen Wechsels in den oberen und unteren Bereich des Steinbruchs Eberstadt dar. Die Permeabilitäten sind auch einzeln zu betrachten, um Variationen innerhalb dieses Bereichs stärker auszuprägen (e unten, f oben). Deutlich zeigen sich die höheren Permeabilitäten im oberen Bereich des Modells.

Die numerischen Ergebnisse der Permeabilitäten sind zusätzlich auch in Tabelle 6.10 dargestellt. Sehr ähnlich in ihrer Ausprägung und Größe sind die Permeabilitäten  $K_{xx}$  und  $K_{yy}$ . Sie weisen Werte von mehr als 24 md auf (Tabelle 6.10, Abbildung 6.17). Die Permeabilitäten liegen genau parallel zur

Raumlage der Klüfte. Die Klüfte bieten so ideale Wegsamkeiten für die Fluide in diese Richtung. Am höchsten sind die Permeabilitäten in  $K_{zz}$  Richtung. Hier liefert die Kombination aus beiden Hauptkluftrichtungen den hohen Wert, da beide ungefähr saiger stehen. Die Permeabilitäten beider Klüfte addieren sich so zum Teil. Insgesamt sind die Permeabilitäten in die anderen Raumrichtungen niedriger. Bei der Berechnung mit der Oda Methode kann es bei den diagonalen Raumrichtungen respektive  $K_{xy}$ ,  $K_{yz}$  und  $K_{zx}$  zu negativen Permeabilitätswerten kommen, wenn beispielsweise 2 der 3 Komponenten des Normalvektors der zugehörigen Kluftfläche negativ sind. Die Permeabilitäten in diese 3 Raumrichtungen sind insgesamt um eine Größenordnung kleiner als die in orthogonale Richtungen. Die diagonalen Richtungen liegen ungefähr im  $45^\circ$  Winkel zur Kluftorientierung, so dass durch die Klüfte in diese Richtung die Permeabilität nur gering erhöht werden kann.

Tabelle 6.10 Ergebnisse des Aufskalierungsprozesses nach Oda des oberen und unteren Bereichs des Rastermodells des Steinbruchs Eberstadt.

Parameter	Oben	Unten
Apertur	0,01 mm	0,01 mm
$K_{xx}$ [md]	24,26	24,92
$K_{yy}$ [md]	26,71	15,70
$K_{zz}$ [md]	45,44	34,99
$K_{xy}$ [md]	7,32	1,67
$K_{yz}$ [md]	1,9387	0,81
$K_{zx}$ [md]	-2,3396	-4521
Sigma-Faktor	259	144
P32	8,6	6

Insgesamt sind die Permeabilitäten im oberen Bereich höher als im unteren. Für die Kombination aus beiden Kluftscharen sind die Kluftintensitäten als  $P_{32}$  Wert angegeben. Die erhöhte Permeabilität im oberen Bereich kann so auf die höhere Intensität der Klüftung zurückgeführt werden. Ebenso ist der Sigma-Faktor aufgrund der höheren Anzahl der Klüfte größer, da mehr Transferfläche zwischen Kluft und Matrix vorliegt.

Verdeutlicht wird dies auch noch einmal durch Abbildung 6.18. Dargestellt sind dort der  $P_{33}$  Wert, der stellvertretend für die gegebene Kluftporosität im Raum steht, und die Kluftanzahl pro Rasterzelle. Deutlich ist der erhöhte Anteil an Porosität und Kluftanzahl für den oberen Bereich sichtbar, der sich letztendlich direkt auf die Permeabilitäten auswirkt. Die Klüftigkeit ist im vorliegenden Fall proportional zur Permeabilität (da unter anderem auch die Apertur konstant für beide Bereiche ist).

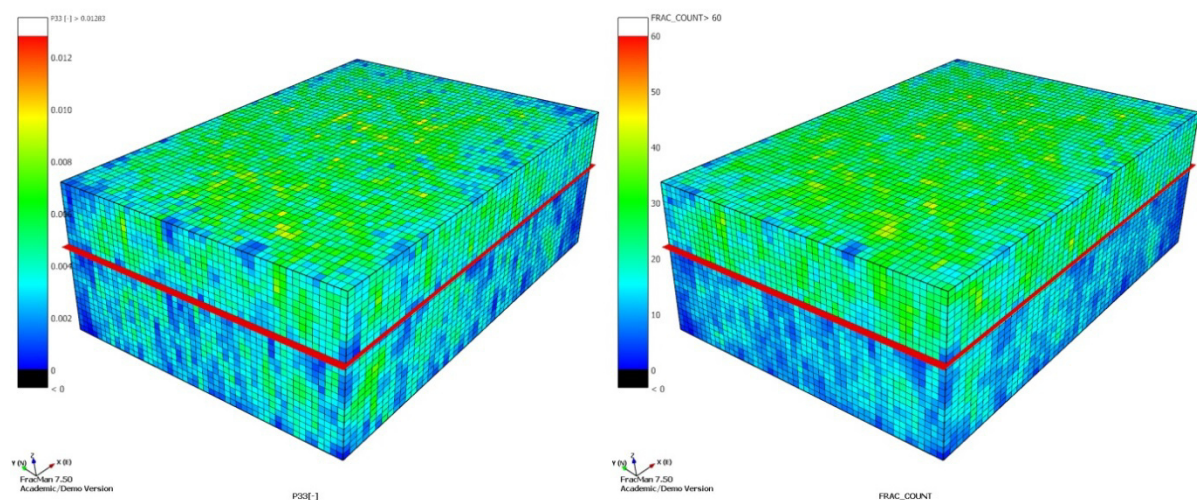
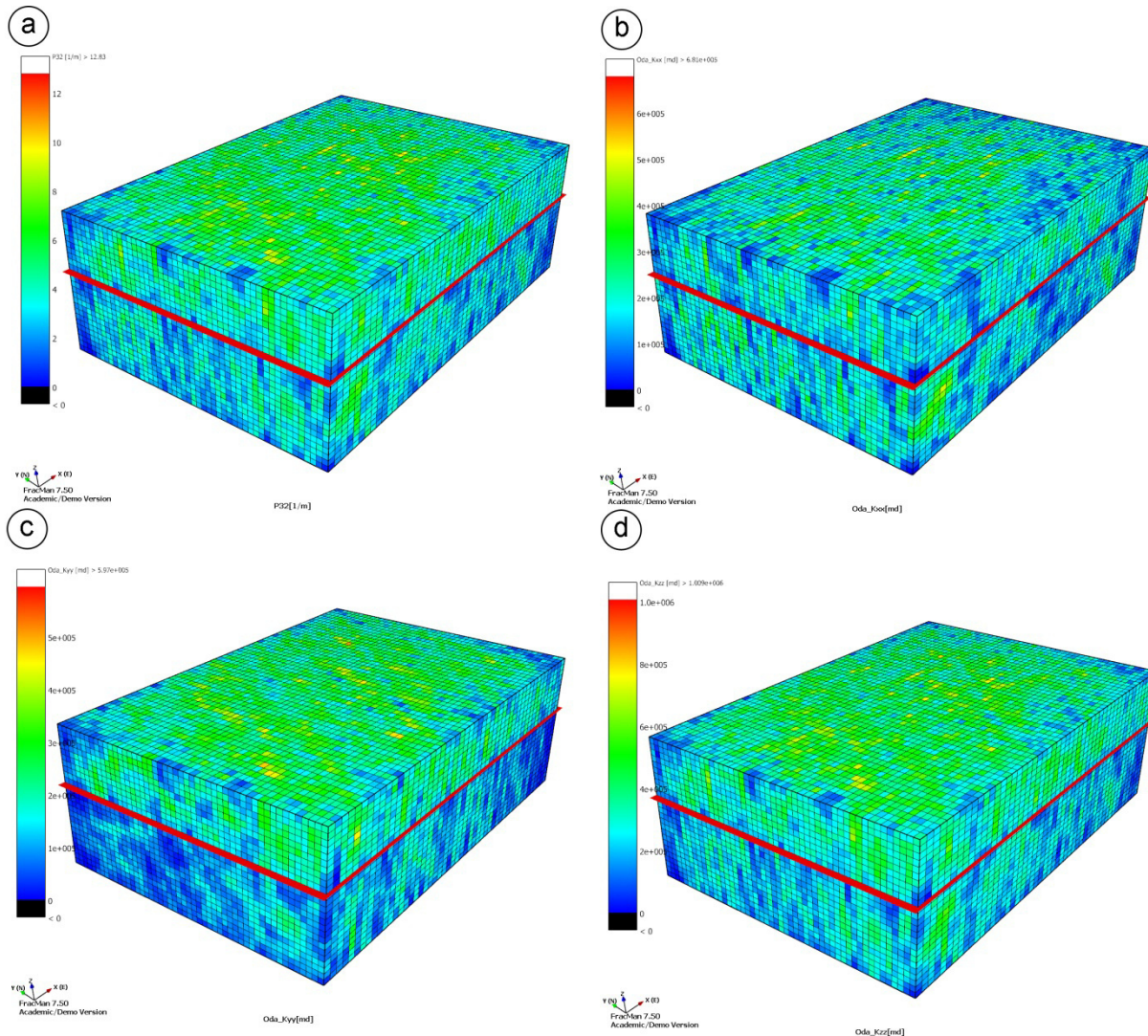


Abbildung 6.18 Darstellung der Kluftporosität  $P_{33}$  (links) und der Kluftanzahl pro Rasterzelle (rechts) des mit der Oda Methode aus dem DFN Modell des Steinbruchs Eberstadt aufskalierten Rasters.



### Oda Gold

Ebenfalls werden die Permeabilitäten, die sich aus dem DFN Modell des Steinbruchs Eberstadt ergeben, mit der Oda Gold Methode berechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.19 und Tabelle 6.11 dargelegt. Wie bei der Oda Methode ist auch hier die Kluftporosität  $P_{33}$  im oberen Bereich höher als im unteren (Abbildung 6.19 a). Dies resultiert wieder in erhöhten Permeabilitäten für alle Raumrichtungen des oberen Bereichs (Abbildung 6.19 b, c und d).



**Abbildung 6.19 Visualisierung der Ergebnisse der Oda Gold Methode.** Dargestellt sind jeweils die Kluftporosität  $P_{33}$  (a) und stellvertretend die Permeabilität  $K_{xx}$  (b),  $K_{yy}$  (c) und  $K_{zz}$  (d). Insbesondere  $K_{yy}$  ist im unteren Bereich deutlich niedriger als im oberen.

In Tabelle 6.11 sind die Permeabilitäten der Oda Gold Methode numerisch wiedergegeben. Als Vergleichsgröße werden die Permeabilitäten der Oda Methode gegenübergestellt und die Differenz berechnet. Es zeigt sich, dass die Permeabilitäten für beide Methoden nahezu identisch sind und maximal um 0,0016 md variieren.

**Tabelle 6.11 Vergleich der Ergebnisse der Oda und Oda Gold Methode am Beispiel des Eberstadtmodells.**

Parameter	Oda	Oda Gold	Differenz
$K_{xx}$ [md]	24,6582	24,6566	0,0016
$K_{yy}$ [md]	20,1060	20,1046	0,0014
$K_{zz}$ [md]	39,1714	39,1698	0,0016
$K_{xy}$ [md]	3,9350	3,9348	0,0002
$K_{yz}$ [md]	1,2653	1,2652	0,0001



<b>K<sub>xx</sub> [md]</b>	-1,2071	-1,2071	0
----------------------------	---------	---------	---

Die geringe Abweichung der Ergebnisse beider Methoden liegt in der hohen Konnektivität des Kluftnetzwerks begründet. Oda Gold führt im Gegensatz zur herkömmlichen Oda Methode vorab eine Konnektivitätsüberprüfung der Klüfte in den Rasterzellen durch und vernachlässigt nicht verbundene Klüfte. Da aber fast jede Kluft mit einer anderen verbunden ist, nutzt die Anwendung des Oda Gold Algorithmus nichts, denn im Modell sind keine nicht verbundenen Klüfte vorhanden. Die Oda Gold Methode ist allerdings immer dann vorzuziehen, wenn die Kluftintensitäten und die Kluftgrößen niedrig sind, was in einer geringen Konnektivität zum Ausdruck gebracht wird.

### **Auflösung des Rasters**

Unabdingbar für einen Aufskalierungsprozess ist die richtige Wahl der Auflösung des Rasters, das über ein DFN Modell gestülpt wird. Eine zu grobe Auflösung führt zu sehr großen Zellen, in denen der Einfluss einzelner Klüfte nicht mehr ausreichend zum Tragen kommen kann. Die komplette Arbeit des DFN Modells kann so zerstört werden. Eine zu niedrige Auflösung hingegen führt zu einem äußerst detaillierten Bild, ist nicht mehr praktikabel und erfordert sehr hohe Rechenzeiten. Eventuell verbleiben manche Zellen leer und ohne aufskalierte Klufterigenschaften.

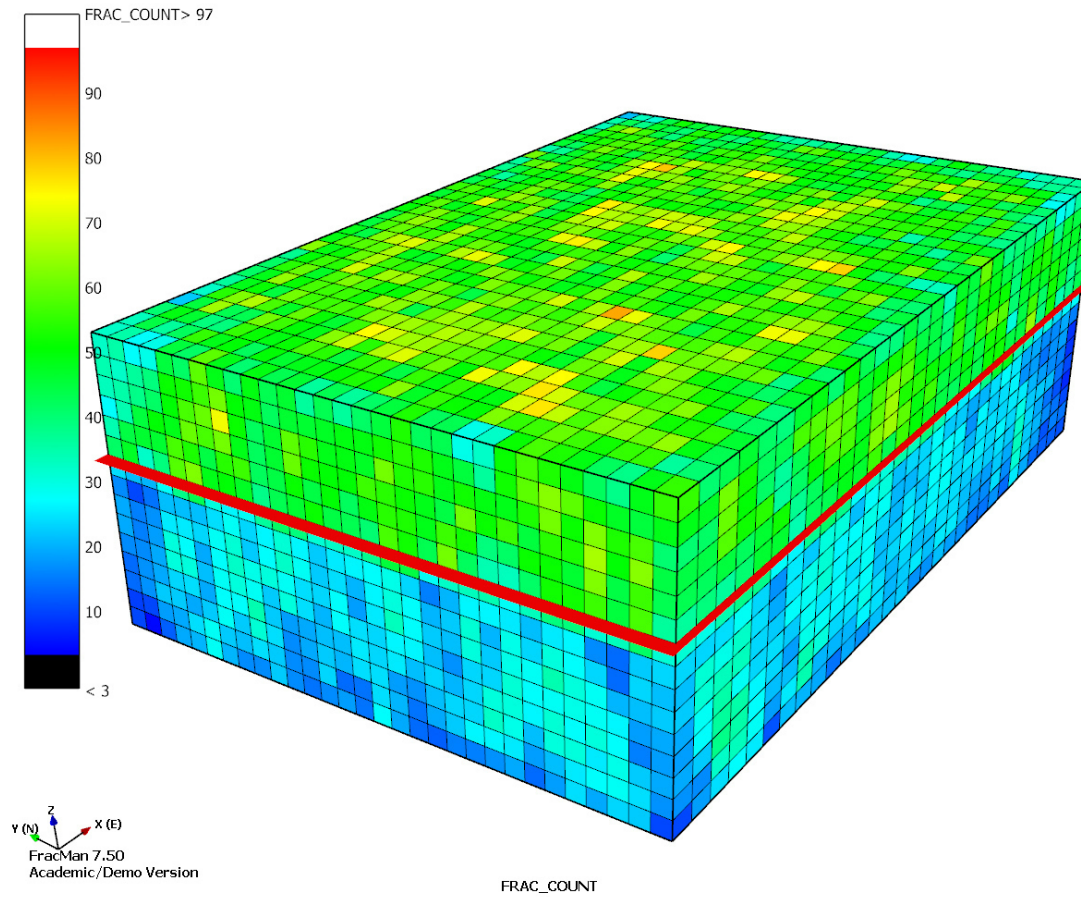
Beispielhaft werden zwei unterschiedliche Rastergrößen über das DFN Modell des Steinbruchs Eberstadt gelegt und mit der Oda Methode die hydraulischen Eigenschaften aufskaliert. Es handelt sich hierbei nicht um Extrembeispiele, sondern beide sind praktikable Lösungen für den Aufskalierungsprozess. Einzig die Unterschiede und somit die Sensibilität des Modells auf die Rasterauflösung sollen hier dargelegt werden. Die Modelle haben jeweils eine Ausdehnung von 150\*100\*50 Metern und eine Auflösung von 30\*30\*15 Zellen (grobes Modell) bzw. 50\*50\*25 Zellen (feines Modell).

**Tabelle 6.12 Ergebnisse der Oda Methode für das grobe und feine Raster, in das das DFN Modell des Steinbruchs Eberstadt aufskaliert wird.**

<b>Parameter</b>	<b>Grob</b>	<b>Fein</b>	<b>Differenz</b>
<b>K<sub>xx</sub> [md]</b>	24,6588	24,6582	0,0006
<b>K<sub>yy</sub> [md]</b>	20,1065	2,01060	0,0005
<b>K<sub>zz</sub> [md]</b>	39,1724	39,1714	0,0010
<b>K<sub>xy</sub> [md]</b>	3,9351	3,9350	0,0001
<b>K<sub>yz</sub> [md]</b>	1,2653	1,2653	0
<b>K<sub>zx</sub> [md]</b>	-1,2071	-1,2071	0
<b>P32</b>	4,996	4,996	
<b>P33</b>	0,004996	0,004996	
<b>Kluftanzahl pro Zelle (Frac Count)</b>	45,77	22,7648	
<b>Sigma-Block-Vol.</b>	0,1396	0,11688	
<b>Sigma-Faktor</b>	102,77	117,53949	

Die Ergebnisse des groben und des feinen Rasters finden sich in Tabelle 6.12. Die Unterschiede sind im Bereich der Permeabilitäten marginal zwischen den beiden Rastern. Kein signifikanter Unterschied kann hier festgestellt werden. Dies zeigt sich auch in den beiden identischen P<sub>32</sub> und P<sub>33</sub> Werten, die maßgeblich die Permeabilität beeinflussen. Aufgrund der unterschiedlichen Zellgröße unterscheiden sich jedoch maßgeblich die Anzahl der Klüfte pro Zelle sowie das Sigma-Block-Volumen und auch der Sigma-Faktor voneinander. Während die beiden erstgenannten im gröberen Raster höher sind, ist der Sigma-Faktor im gröberen Raster niedriger. Das Sigma-Blockvolumen ist das Ergebnis der Multiplikation der Kluftabstände in alle 3 Raumrichtungen und gibt somit ungefähr das Volumen der Gesteinsmatrixblöcke wieder. Je größer die Rasterzellen sind, desto größer ist der maximal mögliche und innerhalb einer Zelle detektierbare Kluftabstand. Dieser Umstand erklärt die hier unterschiedlichen Werte.

Die Kluftanzahl pro Zelle des groben Rasters ist in Abbildung 6.20 dargestellt. Im Gegensatz zum feineren Raster (vgl. Abbildung 6.18 rechts) ist der Unterschied in der Kluftanzahl zwischen dem oberen und unteren Bereich stärker wahrnehmbar. Im Bereich der Visualisierung ist die Rastergröße ein starkes Werkzeug um lokale Variationen deutlicher darstellen zu können.



**Abbildung 6.20 Visualisierung der Kluftanzahl pro Zelle des größeren Rasters des Eberstadtmodells. Die Anzahl der Klüfte ist im oberen Bereich deutlich höher. Die geringe Rasterauflösung stellt diesen Unterschied visuell deutlicher dar.**

### **Block K – Dynamisches Aufskalieren**

Wie bereits die Berechnung hydraulischer Parameter nach Oda wird auch das dynamische Aufskalieren am Beispiel des Steinbruchs Eberstadt durchgeführt. Das dynamische Aufskalieren ist im Gegensatz zur Oda Methode ein sehr zeit- und rechenintensives Verfahren. Daher wird nur ein Teilbereich des DFN Modells betrachtet und dementsprechend ein kleineres Raster verwendet. Das verwendete Raster hat eine Größe von 30\*30\*16 Zellen und eine Ausdehnung von 17 \* 17 \* 9 Metern. Erstellt wird also ein sehr feines Raster, um der hohen Klüftigkeit des Steinbruchs und somit dem sehr hoch-aufgelösten DFN Modell gerecht zu werden.

**Tabelle 6.13 Ergebnisse des dynamischen Aufskalierens des DFN Modells im Steinbruch Eberstadt.**

Parameter	[m <sup>2</sup> ]	mD
<b>Block K<sub>xx</sub></b>	1,8 * 10 <sup>-14</sup>	18,4
<b>Block K<sub>yy</sub></b>	1,6 * 10 <sup>-14</sup>	16,3
<b>Block K<sub>zz</sub></b>	3,4 * 10 <sup>-14</sup>	34,7

Die Ergebnisse zeigen (Tabelle 6.13), dass die Permeabilität in die 2 horizontalen Richtungen ungefähr gleich groß ist. In K<sub>xx</sub> Richtung ist sie etwas höher als in K<sub>yy</sub> Richtung. In vertikaler K<sub>zz</sub> Richtung ergibt sich ein Wert, der so groß wie die Summe der beiden anderen Richtungen ist. Beide Kluftscharen stehen nahezu saiger und tragen so gemeinsam zur Erhöhung der Permeabilität entlang der Vertikalen bei, während in die horizontalen Richtungen nur teilweise beide Kluftscharen gemeinsam die Permeabilität im prägend erhöhen können.

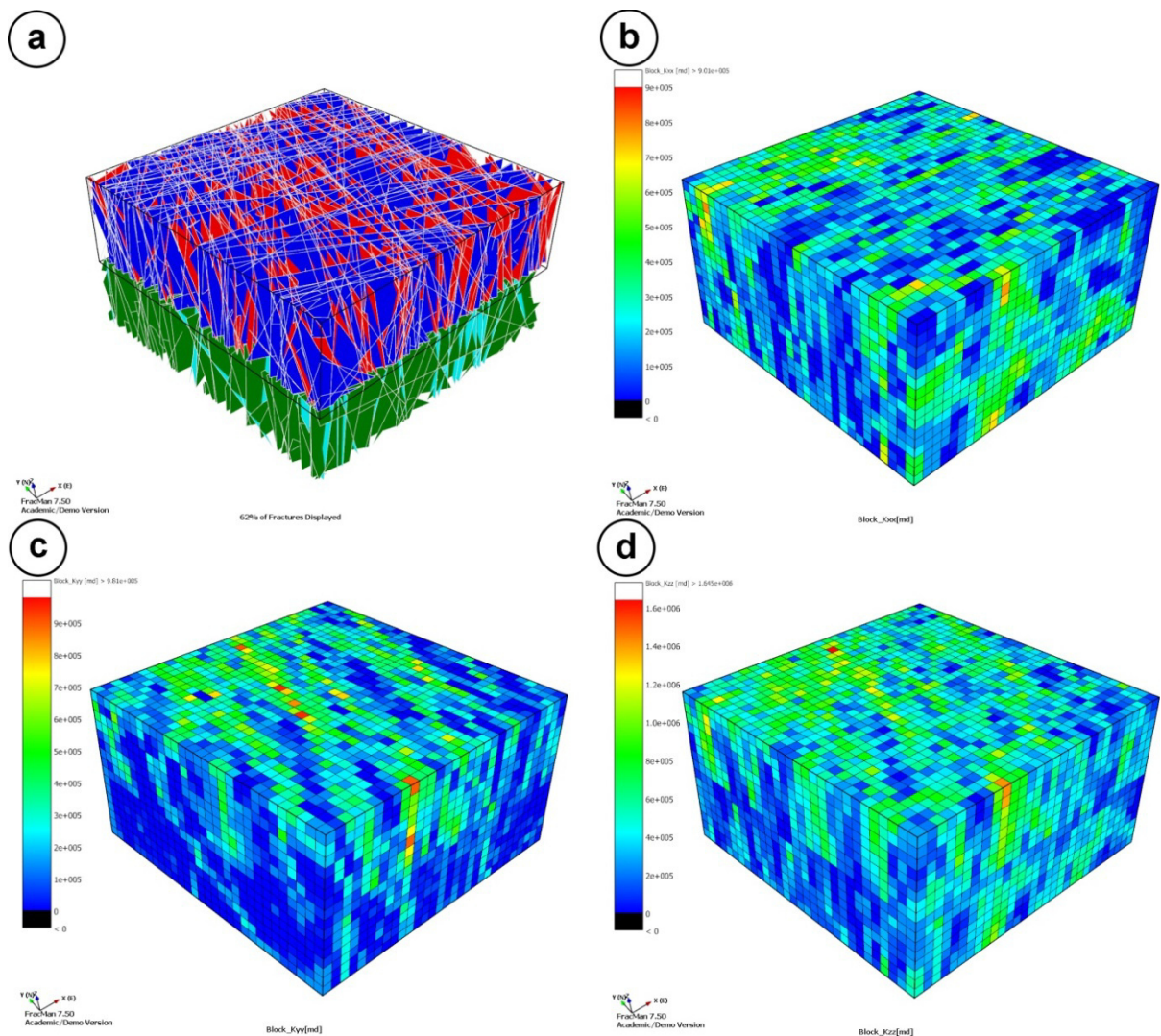


Abbildung 6.21 Visualisierung der berechneten Permeabilitäten durch das dynamische Aufskalieren. (a) – Das der Berechnung als Grundlage dienende DFN Modell des Steinbruchs Eberstadt. Visualisierung der  $K_{xx}$  (b),  $K_{yy}$  (c) und  $K_{zz}$  (d) Permeabilitäten im Raster.

**Vergleich beider Methoden**

Obwohl die Oda Methode eine sehr schnelle Methode ist, trifft sie doch viele Vereinfachungen. Als genauer gilt hier das dynamische Aufskalieren, was jedoch zeit- und rechenintensiver ist. In Tabelle 6.14 sind die Ergebnisse beider Methoden gegenübergestellt. Insgesamt sind die Werte der Oda Methode größer als die des dynamischen Aufskalierens, sie liegen für alle 3 Parameter um 25% höher. Beide Methoden zeigen aber innerhalb der 3 Werte gleiche Trends, so ist  $K_{zz}$  stets die größte und  $K_{yy}$  die kleinste Permeabilität. Auch die Unterschiede der Werte zueinander stehen im gleichen Verhältnis.

Tabelle 6.14 Vergleich der Ergebnisse der Oda Methode und des dynamischen Aufskalierens am Beispiel des DFN Modells Eberstadt.

Parameter	Wert [m <sup>2</sup> ]	Parameter	Wert [mD]	Wert [m <sup>2</sup> ]
Block $K_{xx}$	$1,8 \cdot 10^{-14}$	Oda $K_{xx}$ [md]	23,77	$2,33 \cdot 10^{-14}$
Block $K_{yy}$	$1,6 \cdot 10^{-14}$	Oda $K_{yy}$ [md]	20,96	$2,05 \cdot 10^{-14}$
Block $K_{zz}$	$3,4 \cdot 10^{-14}$	Oda $K_{zz}$ [md]	39,849	$3,9 \cdot 10^{-14}$

Beide vorgestellten Methoden berechnen einen Permeabilitätstensor innerhalb einer Rasterzelle aus einem DFN Modell. Die Genauigkeit aller Ergebnisse beruht in erster Linie auf der Genauigkeit dieses DFN Modells. Die Oda Methode vernachlässigt bei der Berechnung jedoch die Konnektivität und die

Größe der Klüfte. Das dynamische Aufskalieren beruht auf der gesamten Kluftgeometrie. Unterschiede in der Geometrie von Klüften können entscheidend sein bei der Evaluierung von Durchlässigkeiten im Gestein. Berechnungen, die eine hohe Genauigkeit verlangen, werden nur durch das dynamische Aufskalieren erreicht.

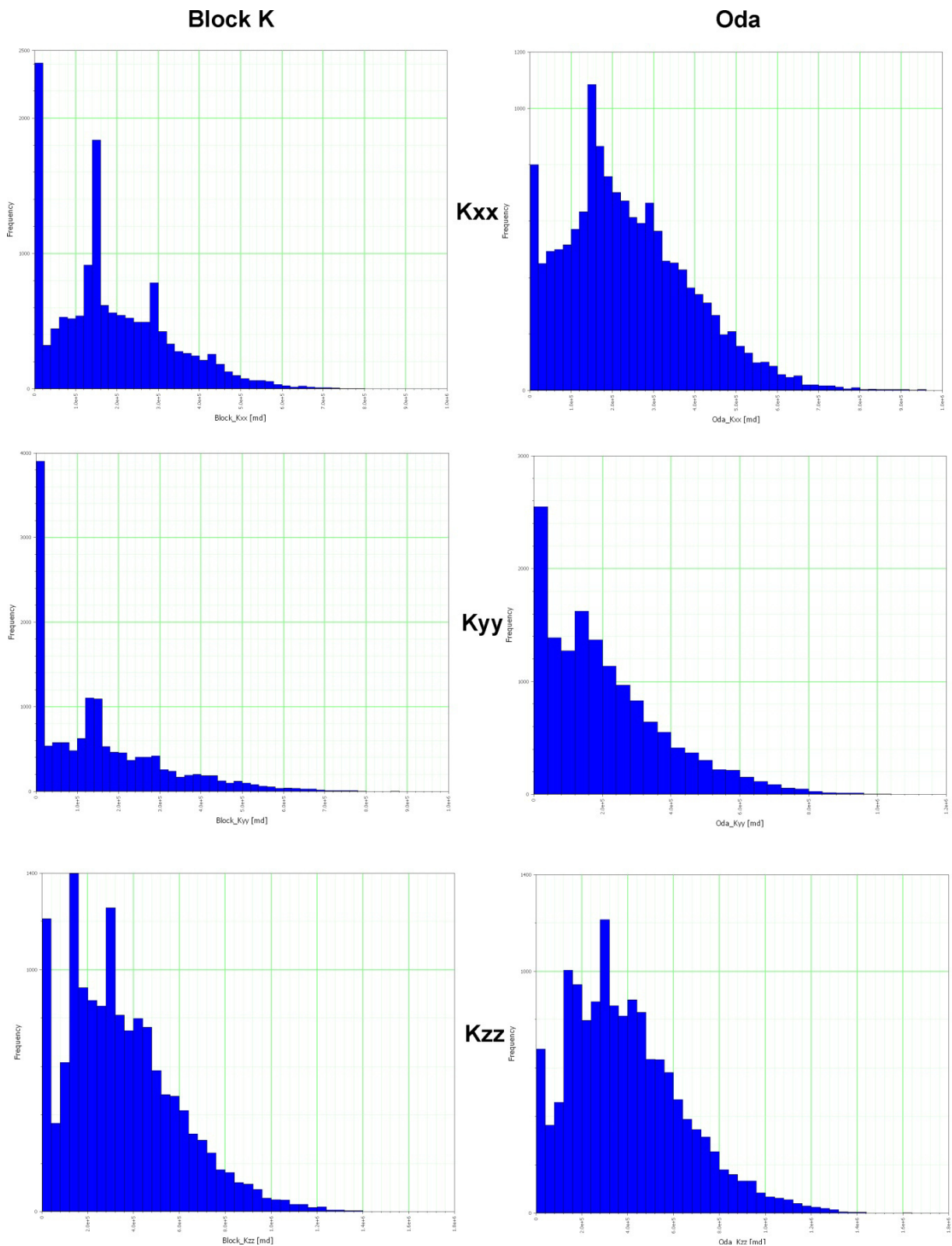


Abbildung 6.22 Vergleich der berechneten Permeabilitäten nach Oda und dem dynamischen Aufskalieren (Block K Methode) in 3 Hauptrichtungen.



Ein Vergleich der Histogrammdarstellungen der Ergebnisse zeigt für  $K_{xx}$ ,  $K_{yy}$  und  $K_{zz}$  vergleichbare beziehungsweise ähnliche Verteilungen (Abbildung 6.22). Bei der Block K Methode (dem dynamischen Aufskalieren) überwiegen minimale Permeabilitätswerte. Dieses Minimum ist bei der Oda Methode schwächer ausgeprägt, so dass die übrigen Bereiche relativ dazu häufiger auftreten. Dieses Maximum der Häufigkeit bei minimalen Permeabilitätswerten ist die Erklärung für die unterschiedliche Gesamtpermeabilität beider Methoden. Eine hohe Konnektivität des Modells ist von Grund auf gegeben, wodurch das dynamische Aufskalieren seine Stärken gegenüber der Oda Methode nicht ausspielen kann. Die schnelle Oda Methode ist für ein Modell wie das des Steinbruchs Eberstadt ausreichend. Die niedrigen Permeabilitätswerte, wie sie in der Histogrammdarstellung zu erkennen sind (Abbildung 6.22), beruhen auf einer nicht vorhandenen Konnektivität einzelner Zellen. Darin begründen sich auch die Unterschiede in den Ergebnissen zwischen beiden Aufskalierungsmethoden.

### Diskussion

Da die Apertur, die den Haupteinfluss auf die Permeabilität besitzt, konstant für alle Kluft- und Trennflächenscharen des Modells angenommen wird, beruhen Variationen des berechneten Permeabilitätstensors allein auf der Geometrie und Verteilung der Klüfte. Die Permeabilität ist in Richtung der Kluftausdehnung am Größten. In einem orthogonalen Kluftnetzwerk, wie dem des Steinbruchs Eberstadt, werden die höchsten Permeabilitäten parallel zur Orientierung der beiden Hauptkluftscharen 1 und 2 erwartet. Das erstellte Raster und seine Rasterzellen liegen parallel zu den Klüften des DFN Modells. Die xx-Richtung liegt somit parallel zu den Klüften (und orthogonal zur Öffnung der Klüfte) der Schar 2 und die yy-Richtung parallel zur Richtung der Schar 1.

Die Ergebnisse der Oda Methode zeigen, wie zu erwarten, eindeutig die höchsten Permeabilitätswerte entlang dieser beiden Richtungen (vergleiche Tabelle 6.12). Die Permeabilitäten in die anderen Raumrichtungen fallen deutlich ab. Eine Ausnahme stellt hier die zz-Richtung dar. Diese rein vertikale Komponente zeigt die höchsten Permeabilitätswerte des Modells. Diese Richtung kombiniert beide Hauptklüftungen, da beide saiger und so in vertikaler Raumrichtung stehen. Die Permeabilitäten beider Kluftscharen addieren sich hier nahezu. Eine Erklärung der höheren Permeabilitäten in xx-Richtung für den Parameter  $K_{xx}$  liefert die Intensität der Klüftung. Bereits verdeutlicht ist die Proportionalität der Kluftintensität zur Permeabilität. Die Kluftchar 2 hat eine höhere Intensität als Schar 1 (siehe Tabelle 6.7). Diese parallel zur xx-Richtung liegende Schar erhöht somit die Permeabilität in  $K_{xx}$  Richtung mehr als die in ihrer Häufigkeit seltener auftretende Schar 1.

Weiterhin zeigt sich, dass die Permeabilitäten für den simulierten Teilbereich A (oben) höher sind als die des Bereichs B (unten). Hier zeigt sich eindeutig die direkte Abhängigkeit der Kluftintensitäten ( $P_{10}$ ,  $P_{32}$ ,  $P_{33}$ ) zur Permeabilität, denn auch die Intensitäten sind im oberen Bereich A höher als im Bereich B.

Der Oda Algorithmus ist eine gute Methode bei der Betrachtung von DFN Modellen, die auf Klüften mit hoher Intensität beruhen bei denen in jeder Rasterzelle eine hohe Anzahl an Klüften vorkommt. So besteht auch ein linearer Zusammenhang zwischen Oda Methode und dem dynamischen Aufskalierungsprozess (Golder Associates 2014, Golder Associates 1999-2015). Die Oda Methode kann dann genutzt werden, um die Ergebnisse des dynamischen Aufskalierens vorherzusagen. Somit erübrigt sich die Berechnung des dynamischen Aufskalierens in jeder Rasterzelle und kann auf einige wenige Zellen beschränkt werden, um die Korrelation zur Oda Methode festzulegen. Auf diese Weise wird die gesamte zeitintensive Berechnung drastisch reduziert.

Im Vergleich mit real durchgeführten Pumpversuchen zur Ermittlung von Permeabilität bzw. Transmissivität zeigt sich, dass die hier in den Modellen berechneten Permeabilitäten unter den Ergebnissen der Permeabilitätsuntersuchungen aus Bohrungen liegen. Die Tests ergeben für den Muschelkalk in der Region Durchlässigkeiten von  $2 \cdot 10^{-6}$  m/s (Stober und Jodocy 2009; Bär 2012) sowie bei 250 mD ( $2,33 \cdot 10^{-13}$  m<sup>2</sup>) für das Gestein selbst (Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau 2010), welche jedoch zusätzlich durch sekundäre Permeabilität (darunter auch Klüfte) in dem Gebiet ansteigen können. Die sekundäre Porosität durch Klüfte und Verkarstung spielt eine zentrale Rolle bei der Permeabilität. Die hier berechneten Werte liegen zwischen  $1,9$  und  $3,4 \cdot 10^{-7}$  m/s und sind damit eine Größenordnung niedriger als in den Tests. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die wahre Apertur der Klüfte, von denen die Permeabilität direkt abhängt, eventuell höher ist als die hier in der Arbeit gewählten 0,01 mm. Es gilt zudem zu bedenken, dass nur die reine Kluftpermeabilität berücksichtigt wird und der Anteil der Gesteinspermeabilität in dem DFN Modell vernachlässigt ist.

In den Ergebnismodellen und Visualisierungen (Abbildung 6.21) ist keine wirkliche Richtungsabhängigkeit zu erkennen. Zum einen kann das der Auflösung des Rasters geschuldet sein, die noch feiner gewählt werden müsste, um mehr Details darzustellen. Zum anderen erzeugt die hohe Kluftintensität in dem orthogonalen Kluftnetzwerk ein sehr homogenes Klufraster, das Richtungsabhängigkeiten nahezu aufhebt.

### 6.6.4 Einfluss variierender Inputparameter

Der Einfluss verschiedener Inputparameter auf die resultierende Permeabilität soll im folgenden Kapitel überprüft und dargestellt werden. So wird die Sensitivität des Modells auf variierende Parameter ermittelt und die Wichtigkeit der wahren Ermittlung statistischer Inputparameter bestimmt. Die Apertur wird als konstant angenommen und folgt keiner Verteilung, um einzig den Einfluss der weiteren Trennflächenparameter verdeutlichen zu können.

Beide Aufskalierungsmethoden, die Oda und Oda Gold Methode werden zu diesem Zweck mit jeweils 4 unterschiedlichen DFN Modellen berechnet. Für 2 der Modelle wird jeweils die Intensität verändert. So wird die Intensität der Klüftung (der Eingabeparameter  $P_{32}$ ) zunächst verdoppelt und danach um eine Größenordnung erhöht. Anschließend wird unter Einbehaltung der ursprünglich gemessenen Intensität die Größe der Klüfte geändert. Hier kommt nun keine Größenverteilung mehr zum Einsatz, wie sie im ursprünglichen Modell genutzt wird, sondern es werden 2 konstante Kluftgrößen von 1 und 10 Metern genutzt. Die Ergebnisse werden miteinander verglichen und die Unterschiede diskutiert.

In Tabelle 6.15 sind die Permeabilitätswerte des Ausgangsmodells sowie der 4 variierenden Modelle gelistet. Die Oda Methode berücksichtigt per Definition nicht die Kluftgrößen eines DFN Modells. Dies spiegelt sich auch exakt in den Ergebnissen wider. Die Ergebnisse der 10 und 1 Meter langen Klüfte liegen beieinander und unterscheiden sich nur im Bereich der typischen Schwankungen bei der Realisierung mehrerer Berechnungen der Permeabilität. Allerdings liegen die Ergebnisse etwas über denen des Ausgangsmodells. Da nun kleine Klüfte in dem Modell (kleiner als 1 bzw. 10 Meter) nicht mehr vorkommen, verändert sich auch die Anzahl der Klüfte in den Zellen. Einzelne Klüfte überspannen nun mehrere Rasterzellen häufiger als zuvor. Dies spiegelt sich schlussendlich in höheren Permeabilitätswerten in den einzelnen Zellen wider.

Deutlicher ist der Unterschied bei der Annahme unterschiedlicher Ausgangsintensitäten (Tabelle 6.15). Wie bereits in Kapitel 6.6.3 bemerkt, ist die Permeabilität stark von der Intensität bzw. Klüftigkeit im Gestein abhängig. Eine Verdopplung der Intensität führt ungefähr zu einer Verdopplung der Permeabilität. Ebenso steigt bei der Erhöhung der Ausgangsintensität um eine Größenordnung die Permeabilität um eine Größenordnung an.

**Tabelle 6.15 Ergebnisse der Oda Methode des Eberstadtmodells für variierende Eingabeparameter. Gegenüber dem Ausgangsmodell wird jeweils die Intensität der Klüftung verdoppelt und um eine Größenordnung erhöht, sowie die Größe der Klüfte auf 1 m bzw. 10 m festgelegt.**

Parameter nach Oda	Ausgangsmodell	Doppelte Intensität	1 Größenordnung Intensität	Größe 10m	Größe 1m
<b>Apertur</b>	0,01 mm	0,01 mm	0,01 mm	0,01 mm	0,01 mm
<b>K<sub>xx</sub> [md]</b>	24,65	47,39	243,44	26,13	26,12
<b>K<sub>yy</sub> [md]</b>	20,10	41,18	207,84	24,26	24,29
<b>K<sub>zz</sub> [md]</b>	39,17	77,59	394,67	43,91	80,10
<b>K<sub>xy</sub> [md]</b>	3,93	8,71	44,149	5,25	5,32
<b>K<sub>yz</sub> [md]</b>	1,26	2,05	11,21	1,25	1,21
<b>K<sub>zx</sub> [md]</b>	-1,20	-2,77	-14,16	-1,54	-1,61

In Tabelle 6.16 sind die Ergebnisse der Oda Gold Methode für die vier unterschiedlichen Ausgangsmodelle dargestellt. Anders als die Oda Methode führt die Oda Gold Methode eine Konnektivitätsüberprüfung zwischen den Rasterzellen durch. Diese Methode eignet sich immer dann, wenn das Kluftnetzwerk eine niedrige Konnektivität aufweist, da die Ergebnisse beim Vernachlässigen nicht verbundener Klüfte - diese tragen nicht zu einer Erhöhung der Permeabilität im System bei - präziser werden. Der Trend bei den unterschiedlichen Intensitäten ist identisch zu dem



Trend bei der Oda Methode. Die Erhöhung von Intensität und Permeabilität ist proportional zueinander. Da schon das Ausgangsmodell eine hohe Konnektivität aufweist, sind die Ergebnisse beider Modelle ähnlich, bei der Oda Gold Methode aber dennoch etwas niedriger. Hier werden einige der nicht mit dem Kluftnetzwerk verbundenen Klüfte aussortiert. Eine Veränderung der Größe der Klüfte führt wie bei der Oda Methode zu keiner relevanten Veränderung der Ergebnisse.

**Tabelle 6.16** Ergebnisse der Oda Gold Methode des Eberstadtmodells für variierende Eingabeparameter. Gegenüber dem Ausgangsmodell wird jeweils die Intensität der Klüftung verdoppelt und um eine Größenordnung erhöht, sowie die Größe der Klüfte auf 1 m bzw. 10 m festgelegt.

Parameter nach Oda Gold	Ausgangsmodell	Doppelte Intensität	1 Größenordnung Intensität	Größe 10m	Größe 1m
<b>Apertur</b>	0,01 mm	0,01 mm	0,01 mm	0,01 mm	0,01 mm
<b>K<sub>xx</sub> [md]</b>	23,74	48,96	217,46	24,16	23,91
<b>K<sub>yy</sub> [md]</b>	20,93	43,75	224,28	22,33	23,28
<b>K<sub>zz</sub> [md]</b>	39,62	81,68	391,09	39,88	41,44
<b>K<sub>xy</sub> [md]</b>	4,55	10,17	58,97	6,03	5,58
<b>K<sub>yz</sub> [md]</b>	1,63	0,83	14,02	1,23	1,31
<b>K<sub>zx</sub> [md]</b>	-2,01	-3,14	-18,08	-1,80	-1,59

Eine Veränderung der Kluftgrößen führt nicht zu einer Veränderung der Konnektivität des Modells. Dies liegt in der Kleinräumigkeit und hohen Intensität der Klüftung in dem Steinbruch begründet. Die Klüfte liegen alle eng beieinander und das Gestein ist stark geklüftet. Veränderungen wären hier nur bei einer Abnahme der Intensität bei gleichzeitiger Verringerung der Kluftgröße zu erwarten. Um diesen Sachverhalt zu veranschaulichen, werden zwei weitere Modelle berechnet. Beide haben wieder die gleichen konstanten Werte für Apertur und Kompressibilität, jedoch ist die Intensität um eine Größenordnung und die Größe konstant auf 0,5 Meter reduziert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.17 dargestellt.

**Tabelle 6.17** Vergleich der berechneten Parameter nach der Oda und Oda Gold Methode für das in der Kluftintensität um eine Größenordnung verringerte DFN Modell des Steinbruchs Eberstadt mit angenommener konstanter Kluftgröße von 0,5 Metern. Markant ist die Abnahme der Permeabilität in den 3 Hauptrichtungen zu erkennen.

Parameter	Oda	Oda Gold
<b>Apertur</b>	0,01 mm	0,01 mm
<b>K<sub>xx</sub> [md]</b>	5,08	2,63
<b>K<sub>yy</sub> [md]</b>	5,03	2,67
<b>K<sub>zz</sub> [md]</b>	8,87	5,81
<b>K<sub>xy</sub> [md]</b>	1,15	1,09
<b>K<sub>yz</sub> [md]</b>	0,27	0,26
<b>K<sub>zx</sub> [md]</b>	-0,37	-0,34

Deutlich ist nun ein Unterschied zwischen beiden Methoden auszumachen. Durch die geringe Kluftintensität und -größe ist die Konnektivität im Ausgangs-DFN Modell stark eingeschränkt. Nur die Oda Gold Methode trägt diesem Umstand Rechnung. Die berechneten Permeabilitäten sind nahezu halbiert gegenüber der Oda Methode. Dieser Sachverhalt spiegelt sich allerdings nur in den Ergebnissen der K<sub>xx</sub>, K<sub>yy</sub> und K<sub>zz</sub> Permeabilitäten wider. Die diagonal zu den Klufttrichtungen liegenden Permeabilitäten bleiben unverändert. Entlang dieser Richtung ist aufgrund des orthogonalen Kluftnetzwerks die Permeabilität sehr gering. Die Oda Gold Methode prüft, ob ein Kluftpfad zwischen den Rasterzellen durch die Klüfte existiert. Aufgrund der Orthogonalität des Kluftnetzwerks, das genau parallel zur Ausrichtung des Rasters liegt, existieren in diagonalen Richtung (XY, YZ und ZY), wenige bis keine solcher Verbindungen. Darum wird durch die Oda Gold Methode auch keine Kluft in dieser Richtung aussortiert. Im Endeffekt sind die Permeabilitäten in diese Richtung gleich groß.

Die Ergebnisse bestätigen die hohe Konnektivität des ursprünglichen DFN Modells, die Proportionalität von Kluftintensität und Permeabilität, den Einfluss der Kluftgröße auf die Permeabilitätsberechnungen aufgrund schwindender Konnektivität und geringerer Kluftporosität  $P_{33}$  sowie die Eignung der Oda Gold Methode bei DFN Modellen niedriger Kluftkonnektivität.

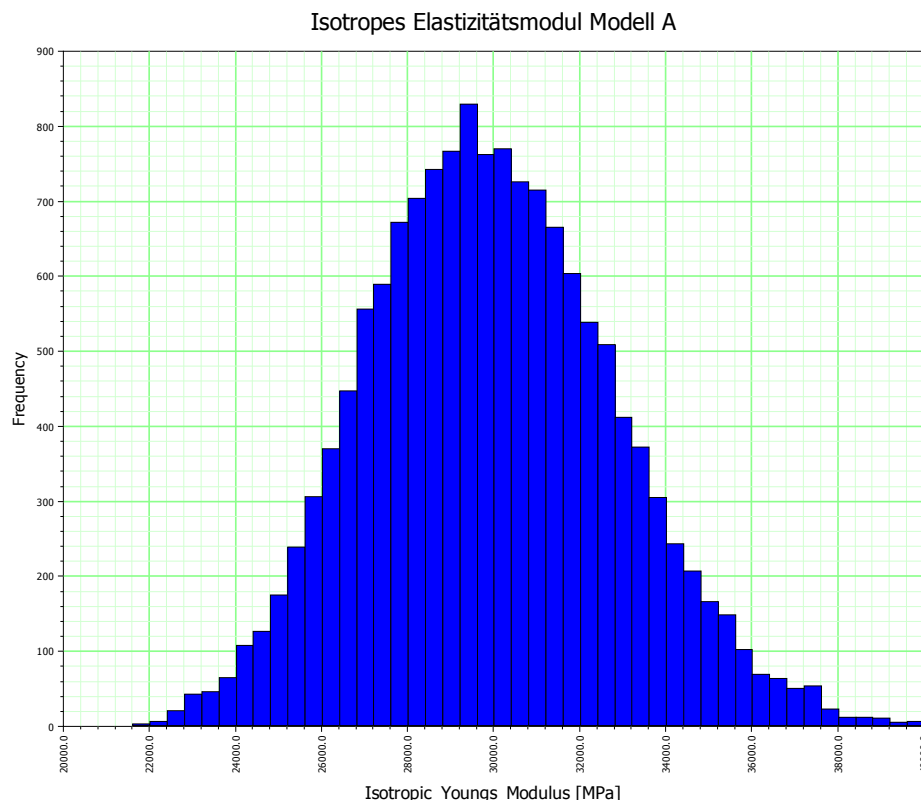
### 6.6.5 Geomechanische Berechnungen

Neben der Aufskalierung hydraulischer Parameter aus einem DFN Modell können auch geomechanische Aufskalierungen durchgeführt werden. Das Prinzip dieser Aufskalierung folgt wiederum dem Ansatz von Oda (Oda 1984) und ist detailliert in Kapitel 6.5.3 vorgestellt. Es ist hierbei möglich, den Elastizitätsmodul und die Poissonzahl in Abhängigkeit des DFN Modells für ein Raster zu bestimmen. Nötig ist die Angabe zweier zusätzlicher Parameter für die Klüfte, die Scher- und die Normalsteifigkeit. Bei der Berechnung des E-Moduls spielt die gewählte Symmetrie eine tragende Rolle. Bei der Aufskalierung der Klufterigenschaften zum Tensor des Elastizitätsmoduls kann hierbei zwischen einem isotropen Tensor, einer vertikal transversalen Isotropie (VTI) und der Berechnung des komplett, anisotropen Tensors gewählt werden.

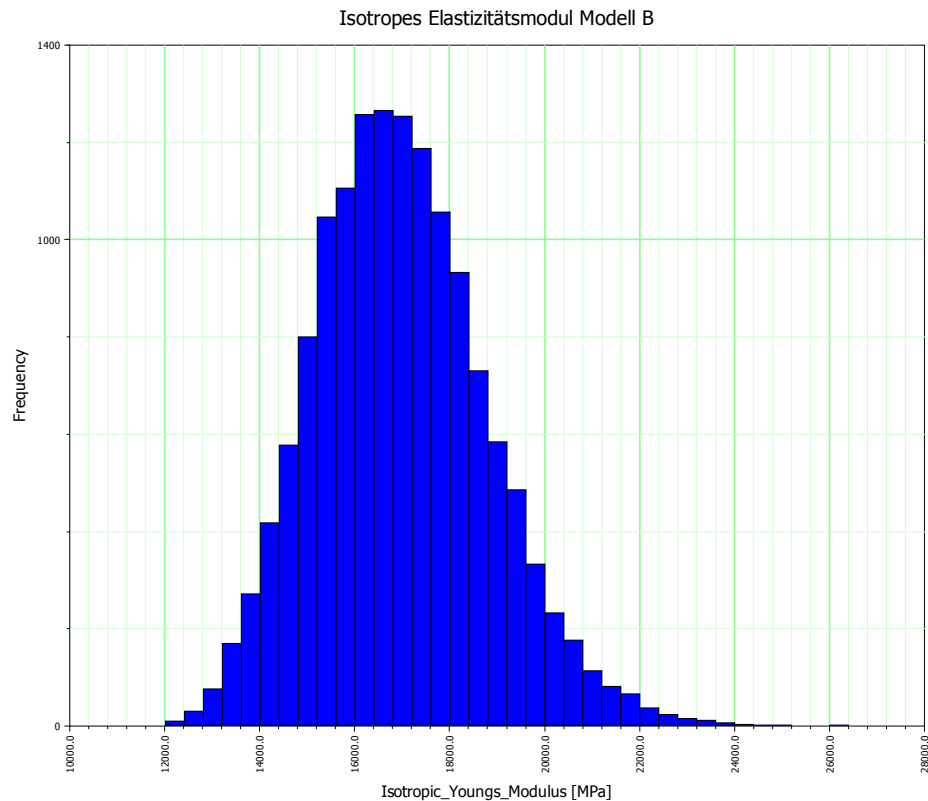
Am Beispiel des DFN Modells des Steinbruchs Eberstadt wird das geomechanische Aufskalieren vorgestellt. Für das Beispielmmodell wird eine Schersteifigkeit von 1000 MPa/m, für die Normalsteifigkeit 10000 MPa/m, ein E-Modul der Gesteinsmatrix von 40 GPa sowie eine Poissonzahl von 0,3 gewählt. Da diese Werte für den untersuchten Steinbruch nicht vorliegen, handelt es sich um reine Literaturwerte (Mavko et al. 2009, Melin 2012, Zangerl et al. 2008, Bandis et al. 1983, Eberhardt et al. 2007, Wang et al. 2001).

Um den Einfluss der Kluftintensität auf den E-Modul darzustellen, werden 2 unterschiedliche Modelle betrachtet. Zum einen das Standard-DFN Modell (Modell A), das sich aus den originalen Kluftparametern der Laserscanuntersuchung zusammensetzt, zum anderen ein Modell mit einer Intensität, die um eine Größenordnung gegenüber den Ausgangsdaten erhöht wird (Modell B). Nach Formel 6.28 nimmt der Elastizitätsmodul mit zunehmender Kluftintensität ab.

Die Ergebnisse der Elastizitätsmodulberechnungen beider Modelle sind als Histogramme (Abbildung 6.23 und Abbildung 6.24) sowie eingefärbt im Raster des Modells (Abbildung 6.25 und Abbildung 6.26) dargestellt. Es handelt sich hierbei um die Ergebnisse der isotropen E-Modulberechnung.



**Abbildung 6.23** Histogramm der berechneten Elastizitätsmodule („Isotropic Youngs Modulus“) in den Rasterzellen des DFN Modells A. Die Ergebnisse sind normalverteilt.



**Abbildung 6.24** Histogramm der berechneten Elastizitätsmodule („Isotropic Youngs Modulus“) in den Rasterzellen des DFN Modells B. Die Ergebnisse sind normalverteilt.

Beide Verteilungen zeigen einen ähnlichen, glockenförmigen Verlauf. Die Ergebnisse von Modell A liegen über denen von Modell B und zeigen zudem eine breitere Streuung der Werte. Diese gleichmäßige Verteilung, die beinahe einer Normalverteilung entspricht, ist der Homogenität des zugrunde liegenden DFN Modells geschuldet. Das Kluftnetzwerk ist sehr regelmäßig, orthogonal und lokal unveränderlich. Zusätzlich ist in der visualisierten Darstellung zu erkennen, dass der E-Modul im unteren Bereich des Modells teilweise höher ist als im oberen. Beide Unterschiede im E-Modul, sowohl zwischen Modell A und B als auch zwischen dem oberen und unteren Bereich, sind auf unterschiedliche Kluftintensitäten im DFN Modell zurückzuführen. Eine erhöhte Kluftintensität, wie sie relativ in Modell B sowie im oberen Bereich beider Modelle vorliegt, führt zu niedrigen E-Modul-Werten.

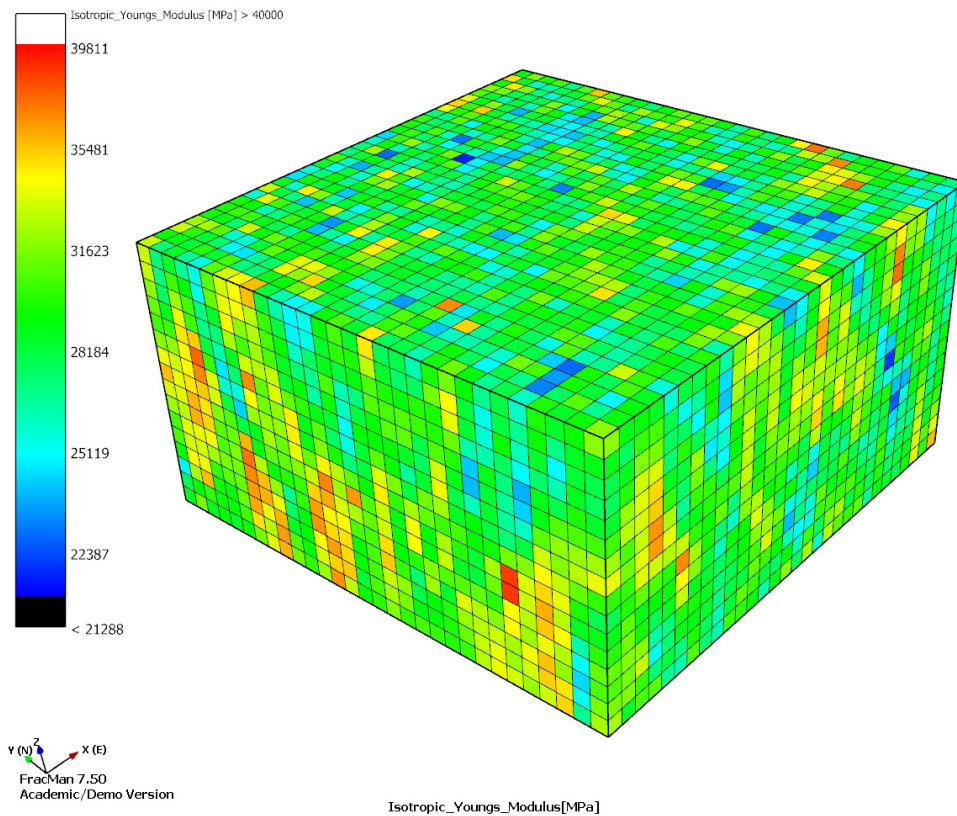


Abbildung 6.25 Visualisierung des isotropen E-Moduls [MPa] des Modells A.

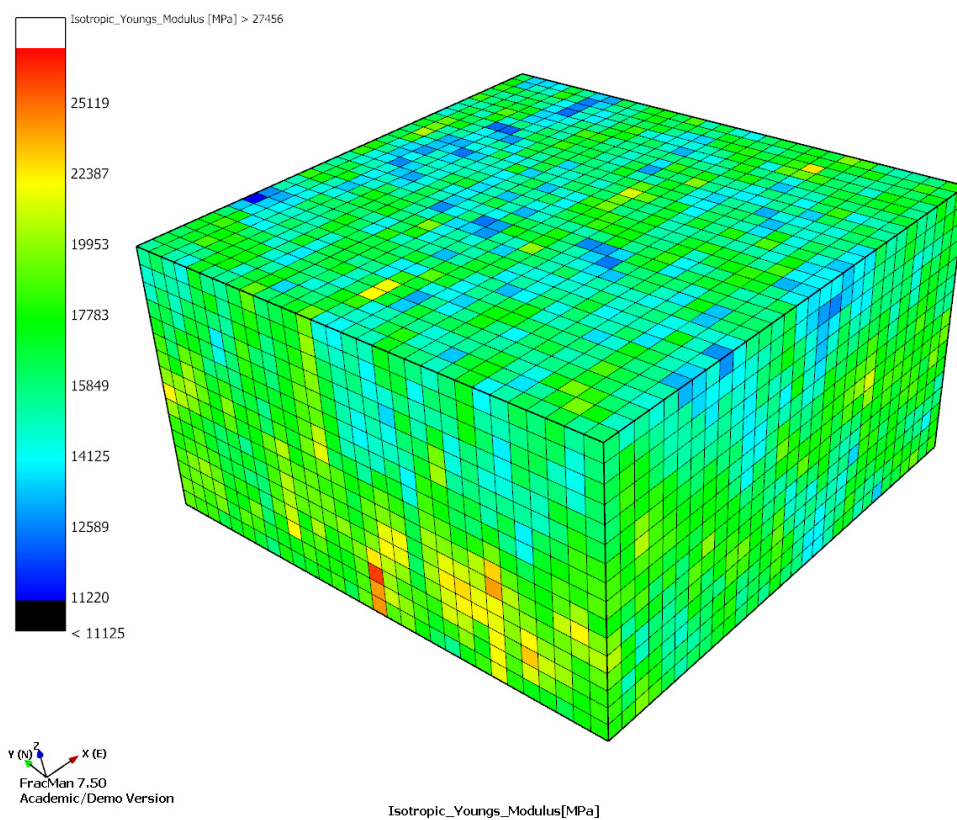


Abbildung 6.26 Visualisierung des isotropen E-Moduls [MPa] des Modells B.

Zusätzlich ist die bei dieser Methode ermittelbare Poissonzahl in Abbildung 6.27 (links oben) dargestellt.

Folgend werden die Ergebnisse des E-Moduls und der Poissonzahl bei VTI-Symmetrie beleuchtet. Bei dieser vertikalen-transversal-isotropen Symmetrie ist die Vertikale gleich der Symmetrieachse und das Modell isotrop entlang der horizontalen Fläche. Die Wahl dieser Symmetrie eignet sich daher gut bei horizontal geschichteten Gesteinsformationen. Die kompletten Ergebnisse berechenbarer Parameter sind in Abbildung 6.27 dargestellt. Zu diesen Parametern gehören das Inplane-Schermodul (in einer Ebene liegendes Schermodul und somit transversal), ein longitudinaler und transversaler E-Modul sowie die Poissonzahl in XY- und XZ-Richtung.

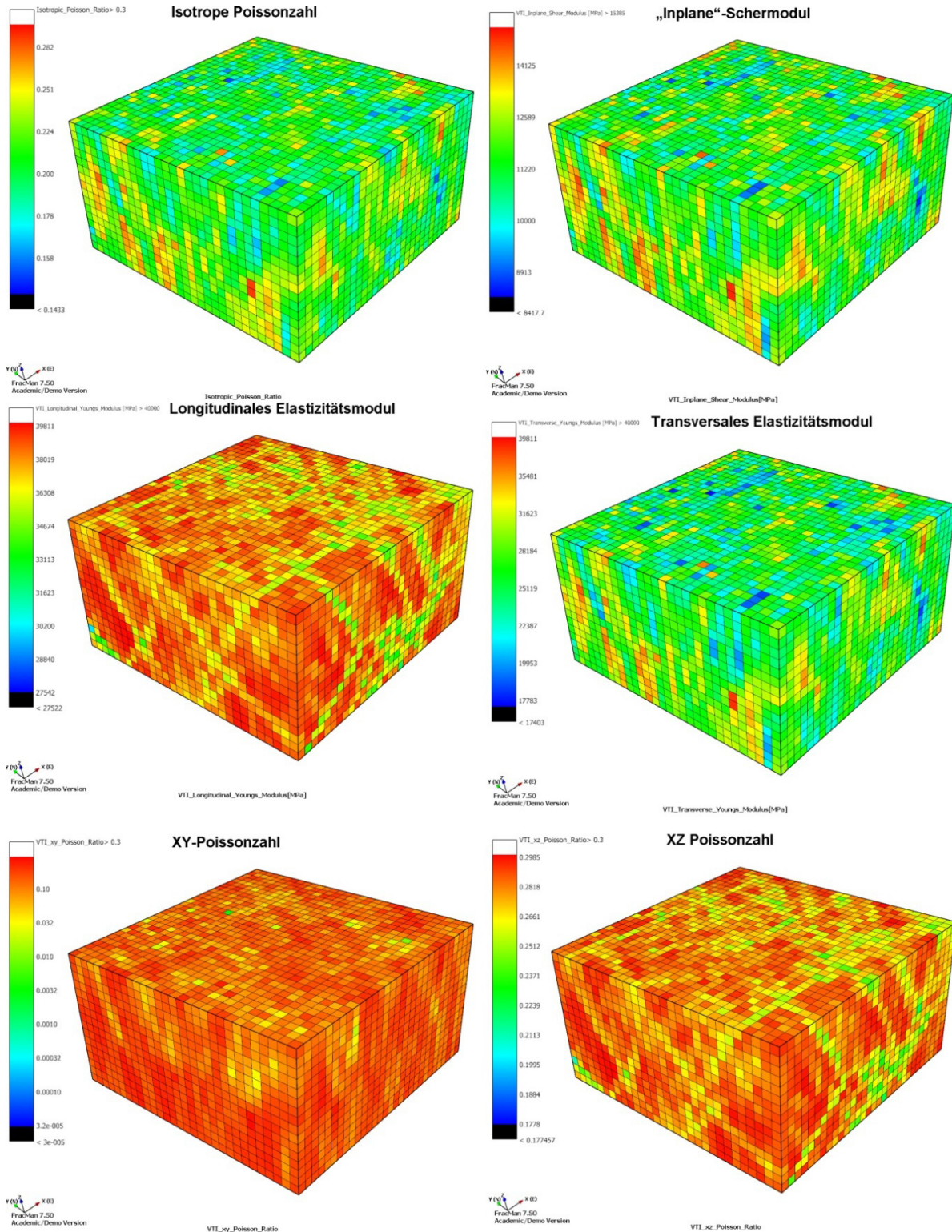
Auffallend bei der Visualisierung ist, dass Schermodul und E-Modul transversal die gleiche räumliche Verteilung aufweisen. Zellen mit hohem E-Modul haben zwangsläufig auch einen hohen Schermodul. Zusätzlich besteht eine gleiche räumliche Verteilung zwischen den beiden transversalen Modulen und den Berechnungen für den Fall der kompletten Isotropie. Der isotrope E-Modul und die isotrope Poissonzahl sind räumlich wie der transversale Scher- und E-Modul verteilt. Eine ähnliche Proportionalität findet sich zwischen dem longitudinalem E-Modul und der Poissonzahl in XZ-Richtung. Diese XZ-Richtung ist ebenfalls longitudinal und somit parallel zur longitudinalen Achse. Das liegt in der linearen Abhängigkeit der Parameter untereinander begründet. Denn für linear-elastisch angenommene, isotrope Körper bzw. Materialien gilt (Mavko et al. 2009):

$$E = 2(1 + \vartheta)G \quad 6.34$$

Mit E als E-Modul,  $\vartheta$  der Poissonzahl und G als Schermodul.

Nicht nur räumlich stimmt die Verteilung hoher und niedriger Werte des transversalen E-Moduls mit dem isotropen E-Modul überein, sondern auch in ihren absoluten Zahlenwerten (siehe Tabelle 6.18, Abbildung 6.25 und Abbildung 6.27). Sie liegen bei 29914 (isotrop) und 27215 MPa (transversal).





**Abbildung 6.27** Visualisierung der ermittelten Parameter auf Grundlage des DFN Modells Eberstadt. Es handelt sich hierbei um die Ergebnisse des Modells A. Dargestellt ist neben den berechneten Parametern der VTI-Symmetrie auch die isotrope Poissonzahl der isotropen Berechnung (oben links). Auffallend ist die räumlich gleiche Verteilung der Werte für die isotrope Poissonzahl, den Schermodul und den transversalen E-Modul sowie den longitudinalen E-Modul und die XZ-Poissonzahl.

Neben der Berechnung für den isotropen Fall und den einer angenommenen VTI Symmetrie wird auch der komplette anisotrope Elastizitätstensor berechnet (Tabelle 6.18). Unabhängig von der gewählten Symmetrie sind die Ergebnisse des Modells B, das auf Grundlage einer erhöhten Kluftintensität erstellt wird, durchgehend niedriger als für Modell A. Es zeigt sich, dass die Formel



$$E_G = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{1}{\frac{1}{E} + \frac{P_{10}}{E_T}} \quad 6.35$$

in den Modellberechnungen bestätigt ist (siehe auch Kapitel 6.5.3). Im Modell nimmt der E-Modul mit der Erhöhung der Kluftintensität  $P_{10}$  ab. Der E-Modul der Matrix  $E$  wird in dem Modell mit 40 GPa angenähert (Mavko et al. 2009). Der durch die Klüfte verringerte E-Modul des gesamten geklüfteten Gesteinskörpers  $E_G$  sinkt deutlich. Die Präsenz der Klüfte senkt den isotropen E-Modul um 10 GPa (Modell A), bei Erhöhung der Kluftintensität um eine Größenordnung sogar um 23 GPa (Modell B). Die Ausgangspoissonzahl verringert sich um 0,09 (Modell A) und um 0,17 (Modell B).

Die VTI-Symmetrie erlaubt einen weiteren Einblick in das Modell. Deutlich wird, dass die Abnahme des E-Moduls und der Poissonzahl transversal höher ist als longitudinal. Auslöser hierfür ist die Raumlage der einzelnen Kluftscharen bzw. des Kluftnetzwerks. Die Klüfte stehen überwiegend orthogonal zur transversalen Achse. In transversaler Richtung ist dadurch die Kluftintensität höher als in longitudinaler (vertikaler) Richtung. Es treten häufiger Klüfte auf, die stärker zur Absenkung von E-Modul und Poissonzahl führen.

**Tabelle 6.18** Ergebnisse der geomechanischen Aufskalierung am Beispiel Eberstadt. Dargestellt sind die Ergebnisse 3er Symmetrie-Typen (Isotrop, VTI und Anisotrop) und die dazu berechneten Parameter, sowohl für Modell A als auch für das hinsichtlich der Kluftintensität um eine Größenordnung veränderte Modell B.

Symmetrie	Parameter	Modell A	Modell B
<b>Isotrop</b>	Isotroper E-Modul [MPa]	29914	16960
	Isotrope Poissonzahl	0,21	0,13
<b>VTI-Symmetrie</b>	Transversales E-Modul [MPa]	27215	12606
	Longitudinales E-Modul [MPa]	37598	31038
	xy-Poissonzahl	0,14	-0,04
	xz-Poissonzahl	0,28	0,21
	Schermodul [MPa]	11859	6581
<b>Anisotrop [MPa]</b>	C11	30556	11670
	C12	7510	1047
	C13	10591	2749
	C14	-1606	-1505
	C15	547	634
	C16	41	37
	C22	28832	11460
	C23	10109	2718
	C24	-1307	-1198
	C25	233	85
	C26	106	493
	C33	43372	32236
	C34	-840	-619
	C35	658	1305
	C36	141	983
	C44	11159	5567
	C45	15	98
	C46	128	165
	C55	12884	7849
	C56	-487	-996
	C66	12627	7903

### 6.6.6 Stabilitätsanalysen

Das Softwarepaket Fracman erlaubt die Durchführung von Stabilitätsanalysen. Sowohl entlang von Hängen (Slopes) als auch Tunneln können solche Analysen durchgeführt werden (FracMan® Fractured Reservoir Analysis & Modelling 2013, Golder Associates 2015, Golder Associates 2014).

Herkömmliche Stabilitätsanalysen basieren auf geometrischen Überlegungen. Die Verschneidung dreier Trennflächenscharen führt zu der Ausbildung von Keilen. Die kinematische Stabilität der Keile wird mit dieser Methode überprüft, basierend auf Vergleichen des Winkels des Keils relativ zum Böschungswinkel. Bei der Überschreitung eines Grenzwinkels gilt ein Keil als kinematisch instabil. Die Methode beruht allein auf einer Möglichkeitsannahme. Es handelt sich um ein mögliches, nicht aber zwangsläufig wahrscheinliches Abrutschen. Weiterhin werden bei dieser Methode alle Trennflächen als omnipräsent und unendlich in ihrer Ausdehnung angesehen. Für jede Trennflächenschar wird ein durchschnittlicher Orientierungswert festgelegt (FracMan® Fractured Reservoir Analysis & Modelling 2013, Golder Associates 2014).

Im Zuge der Stabilitätsanalysen mit Fracman wird ein „Full Block Search“- Algorithmus genutzt. Ausgehend von einer freien Fläche sucht der Algorithmus nach komplex geformten Blöcken entlang einer Oberfläche, die sich aus der Verschneidung verschiedenster Trennflächen ergibt. Anders als die später vorgestellten Algorithmen zur Identifizierung der Blockgrößen (Kapitel 6.6.8) spiegelt dieser Algorithmus die durch die Trennflächen exakt vorgegebene Form wider und nähert diese nicht als Quader an. Würfelförmige Blöcke treten so selten auf, vielmehr handelt es sich bei den identifizierten Objekten um sehr komplexe, polyedrische Formen. Da dieser Algorithmus auf eine Oberfläche beschränkt ist, von der ausgehend die Blöcke identifiziert werden, eignet er sich nicht zur Quantifizierung der Blockgrößen im gesamten Kluftnetzwerk. Diese Ausgangsoberflächen können beispielsweise gerade Flächen sein (Tracemap), eine Tunneloberfläche oder ein digitales Höhenmodell, das trianguliert in Fracman integriert wird und das erzeugte DFN Modell schneidet (FracMan® Fractured Reservoir Analysis & Modelling 2013, Golder Associates 2015).

Die Stabilitätsanalyse in Fracman ist eine Wahrscheinlichkeitsmethode. Blöcke, die wahrscheinlich geometrisch rutschungsgefährdet sind, werden direkt im Modell identifiziert, zudem wird die Wahrscheinlichkeit ihrer Ausbildung bestimmt. In dem Modell gibt es keine Begrenzung der maximal möglichen Anzahl von Trennflächenscharen. Die erzeugten Scharen basieren auf geeigneten Verteilungsfunktionen und Eigenschaften. Es müssen keine weiteren limitierenden Annahmen für das Kluftnetzwerk und sein blockformendes Potential getroffen werden (FracMan® Fractured Reservoir Analysis & Modelling 2013).

Der Arbeitsablauf der Stabilitätsanalysen (auch „DFN Wedge Analysis“) unterteilt sich in mehrere Schritte (FracMan® Fractured Reservoir Analysis 2013, Golder Associates 1999-2015):

- Die Erstellung eines DFN Modells auf Grundlage der zur Verfügung stehenden Kluftdaten, in unserem Fall auf Grundlage der durch das TLS extrahierten Kluftparameter.
- Es folgt die Verschneidung des DFN Modells mit einer Oberfläche. Dies kann ein Tunnel sein, der durch das DFN Modell führt. Es können aber auch einfache erzeugte Flächen sein. In unserem Fall wird das DFN Modell mit einem triangulierten, digitalen Höhenmodell verschnitten, das die Böschung widerspiegelt.
- Potentielle Gesteinsblöcke werden über die Kluftspuren identifiziert, die sich aus der Verschneidung aus DFN Modell und einer Oberfläche ergeben.
- Ausgehend von diesen Kluftspuren folgt der Algorithmus den Klüften in die Gesteinsformation hinein, um mögliche, komplett definierte Blöcke zu detektieren.
- Schlussendlich wird die Blockkinematik evaluiert. Dafür ist die Angabe der Gesteinsdichte und die des zu verwendenden Bruchkriteriums unerlässlich. Es besteht die Auswahl zwischen Mohr-Coulomb (unter Angabe der Kohäsion und des Reibungswinkels) und Barton-Bandis (Dilatations-Winkel, Reibungswinkel, Joint Roughness Coefficient und Joint Wall Strength).

Es erfolgt die Stabilitätsanalyse (aus Golder Associates 2015):

- Blöcke, die in Kontakt mit 3 nicht-koplanaren Flächen sind, gelten als bedingungslos stabil. Unter der Annahme, dass der Block Kontakt mit allen 3 Flächen hat, wird die Normalkraft auf all diesen Flächen berechnet. Sind alle 3 Normalkräfte positiv, so gilt die getroffene Annahme als korrekt und der Block ist bedingungslos stabil.

- Mögliche Rutschung entlang zweier Flächen: Gilt ein Block nicht als stabil, wird überprüft, ob er entlang der Kante zweier Flächen abrutscht. Dazu wird angenommen, dass der Block in Kontakt mit diesen 2 Flächen ist und die Normalkraft auf der Fläche sowie die Scherkraft entlang der Kante der 2 Flächen berechnet wird. Sind die Kräfte positiv, gilt die Annahme als korrekt und der Block rutscht entlang dieser Kante ab.
- Mögliche Rutschung entlang einer Fläche: Sollte der Block auch nicht entlang zweier Flächen rutschen, wird die Überprüfung nun analog entlang einer Einzelfläche durchgeführt. Berechnet werden hierbei die Normalkraft auf der Fläche und 2 Scherkräfte - eine abwärtsgewandte und eine horizontale Scherkraft. Sind die Ergebnisse positiv, so rutscht der Block entlang dieser Fläche.
- Blöcke, die weder bedingungslos stabil sind noch entlang zweier oder einzelner Flächen rutschen, gelten als Blöcke im „freien Fall“.
- Zusätzliche Optionen: Vorhandener Wasserdruck im Gestein sowie mögliche Erdbeben (verändertes Stressregime) können im Modell berücksichtigt werden. Das Potential verschiedener Gesteinsanker kann evaluiert werden.

Als Ergebnis des Vorgangs liefert das Programm alle identifizierten und relevanten Blöcke. Neben der reinen Geometrie dieser Blöcke werden auch weitere Parameter wie die Masse, das Volumen und der Sicherheitsfaktor der Blöcke gespeichert. Es erfolgt zudem eine Quantifizierung der stabilen, instabilen und der sich wahrscheinlich direkt im „freien Fall“ befindlichen Blöcke (FracMan® Fractured Reservoir Analysis & Modelling 2013).

### **Sicherheitsfaktor**

Zu jedem erstellten Block während der Analyse wird auch ein Sicherheitsfaktor (engl. „Factor of safety“) erzeugt. Der Sicherheitsfaktor variiert zwischen null und unendlich, wobei null einen Block beschreibt, der sich im freien Fall befindet, und unendlich einen absolut stabilen Block. Innerhalb der beiden Extrema befinden sich die Fälle des Rutschens entlang einer oder zwei Flächen. Je nach verwendetem Bruchkriterium berechnet sich der Sicherheitsfaktor SF über unterschiedliche Formeln für den Fall des Rutschens entlang einer oder zwei Flächen (Golder Associates 2015, Golder Associates 2014).

Für den Fall des Mohr-Coulomb-Kriteriums beim Rutschen entlang einer Fläche gilt (Golder Associates 2015):

$$SF = \frac{A * c + |N'| * \tan \xi}{S} \quad 6.36$$

Für den Fall des Mohr-Coulomb-Kriteriums beim Rutschen entlang zweier Flächen gilt (Golder Associates 2015):

$$SF = \frac{A_1 * c_1 + |N'_1| * \tan \xi_1 + A_2 * c_2 + |N'_2| * \tan \xi_2}{S_{12}} \quad 6.37$$

Für den Fall des Barton-Bandis-Kriteriums beim Rutschen entlang einer Fläche gilt (Golder Associates 2015):

$$SF = \frac{|N'| * \tan \xi}{S} \quad 6.38$$

Für den Fall des Barton-Bandis-Kriteriums beim Rutschen entlang zweier Flächen gilt (Golder Associates 2015):

$$SF = \frac{|N'_1| * \tan \xi_1 + |N'_2| * \tan \xi_2}{S_{12}} \quad 6.39$$

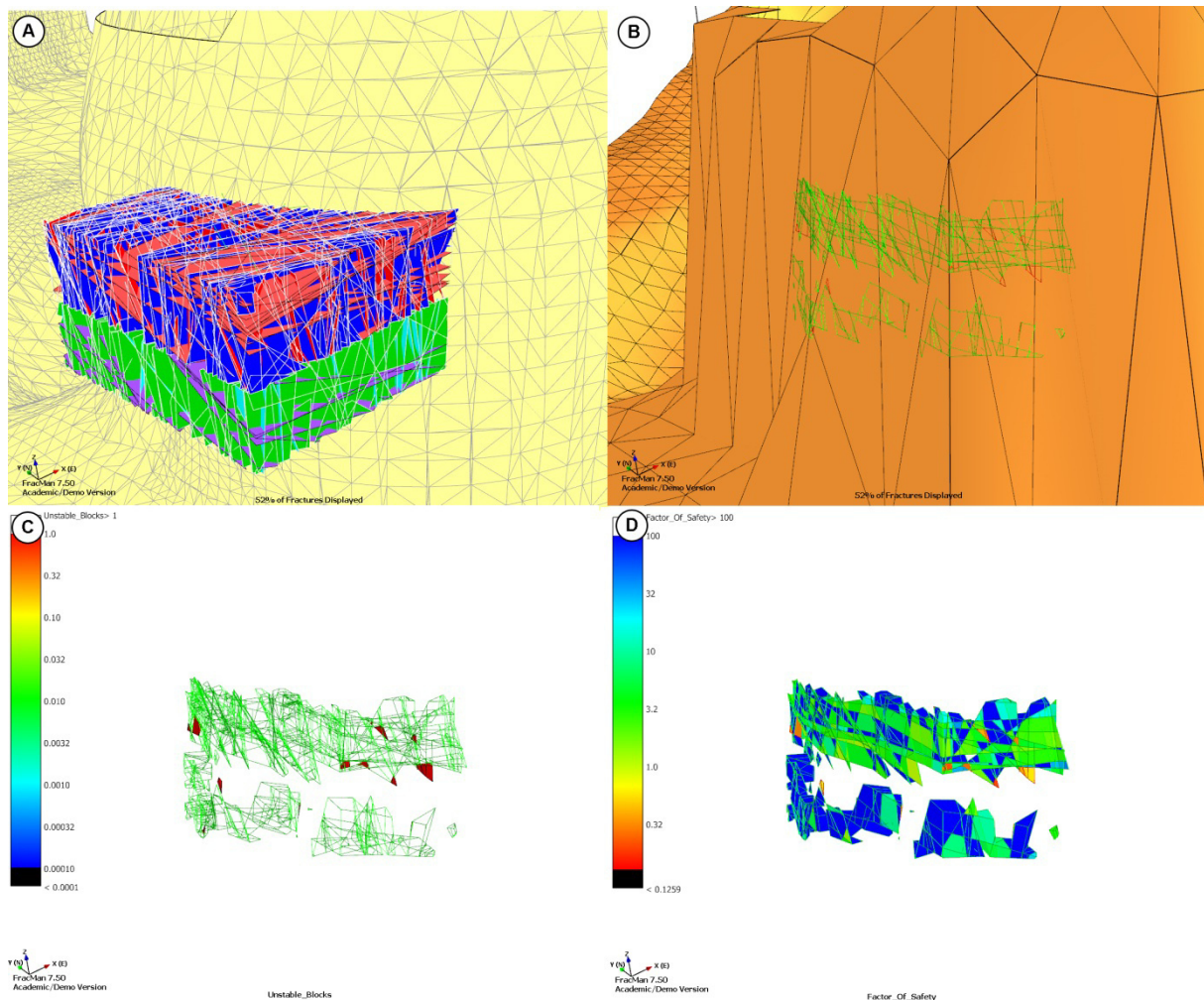
Hierbei ist  $A$  der Flächeninhalt der Kontaktfläche [m<sup>2</sup>],  $c$  der Kohäsionsparameter [N],  $N'$  die Normalkraft auf die Fläche [Pa],  $\xi$  der Dilatationswinkel und  $S$  die Magnitude der Scherkraft [Pa] (Golder Associates 2015).

### ***Hangstabilitäten am Beispiel des DFN Modells Eberstadt***

Mithilfe des für den Steinbruch Eberstadt erstellten DFN Modells soll die Stabilität des mittleren Gesteinsblocks entlang seiner Oberfläche bestimmt werden.

Die Dichte des Kalksteins wird für den gesamten Bereich als konstant mit 2700 kg/m<sup>3</sup> angenommen. Hinzu kommt ein innerer Reibungswinkel von 30° und eine Kohäsion von 30 MPa (Wyllie und Mah 2004, Cruden und Hu 1988, Lacerda 2004, Schellart 2000). Es werden Literaturwerte gewählt, da aus dem Gestein des Steinbruchs vor Ort keine Daten dieser Art gewonnen wurden. Daher handelt es sich in diesem und dem folgenden Beispiel um rein hypothetische Berechnungen, die die Vorgehensweise der Auswertung darstellen.

Um den sehr rechenintensiven Prozess zu beschleunigen, werden 2 Veränderungen an dem Modell vorgenommen. Zunächst wird das DFN Modell auf einen ausgewählten Bereich nahe der Gesteinswand (siehe Abbildung 6.28 A) verkleinert. Es wird darauf geachtet, dass sowohl der obere als auch untere Bereich A und B des Ausgangsmodells übernommen werden. Die unterschiedlichen Kluftscharen sind in der Abbildung farblich markiert (rot und blau – oben, grün und violett – unten). Für das Modell wird zusätzlich auch die Schichtung berücksichtigt, die bei den hydraulischen Berechnungen keine Rolle spielt, aber für die Stabilitätsanalyse mit einbezogen werden muss, da auch entlang dieser Flächen ein Rutschen möglich ist und sich Keile zwischen diesen Trennflächen ausbilden können. Neben der DFN Modellverkleinerung wird auch das digitale Höhenmodell des Steinbruchs Eberstadt stark vereinfacht (siehe Abbildung 6.28 A zu B). Das reduzierte Höhenmodell besteht nur noch aus wenigen Dreiecken, die mit dem DFN Modell verschnitten werden.



**Abbildung 6.28 Visuelle Darstellung der Stabilitätsanalyse.** A – Das verkleinerte DFN Modell innerhalb des ursprünglichen digitalen Höhenmodells des Steinbruchs Eberstadt, beide werden für die Analyse miteinander verschnitten. B – Zuvor wird das Höhenmodell simplifiziert, um die Rechenzeit zu verringern. Entlang der Oberfläche sind die Blöcke dargestellt, grün die stabilen und rot die instabilen Blöcke. C – Ein genauerer Blick auf die erstellten Blöcke, rot markiert sind alle instabilen Blöcke entlang der Aufschlusswand. D – Die Visualisierung des Sicherheitsfaktors erlaubt einen detaillierten Blick auf die Stabilität aller Blöcke. In Rot- und Gelbtönen sind alle instabilen Blöcke ( $SF < 1$ ) markiert, während bedingungslos stabile Blöcke in Dunkelblau dargestellt sind. Dort ist der Sicherheitsfaktor größer als 100.

Visuell sind die Ergebnisse der Stabilitätsanalyse in Abbildung 6.28 B, C und D dargestellt. Zunächst sind die Spuren der berechneten Blöcke auf dem digitalen Höhenmodell unter B markiert. Eine grüne Umrandung steht hierbei für Blöcke, die als stabil angenommen werden. Abbildung 6.28 C erlaubt einen genaueren Blick auf die erstellten Blöcke. Rot gefüllt sind dort alle instabilen Blöcke, die rutschungsgefährdet sind, das heißt entlang einer oder zweier Flächen abrutschen können. Der Sicherheitsfaktor ist in Abbildung 6.28 D dargestellt. Die innerhalb der Farbskala zwischen Rot und Gelb liegenden Blöcke ( $SF < 1$ ) gelten als rutschungsgefährdet. Viele der Blöcke haben einen sehr hohen Sicherheitsfaktor und gelten als bedingungslos stabil (dunkelblaue Markierung,  $SF < 100$ ). Insgesamt werden 984 Blöcke identifiziert, von denen 949 stabil und 35 instabil sind (Tabelle 6.19). Keiner der Blöcke befindet sich im freien Fall. Das durchschnittliche Blockvolumen beträgt  $0,06 \text{ m}^3$ , das Blockgewicht  $160 \text{ kg}$  und die durchschnittliche Blockoberfläche  $0,8 \text{ m}^2$ . Das durchschnittliche Gewicht der instabilen Blöcke ist deutlich geringer und beträgt nur  $17 \text{ kg}$ .

Tabelle 6.19 Die Ergebnisse der Stabilitätsanalyse für die Verschneidung des DFN Modells mit dem digitalen Geländemodell des Steinbruchs Eberstadt.

Parameter	Wert
Anzahl Blöcke	984
Stabile Blöcke	949
Instabile Blöcke	35
Blöcke im „Freien Fall“	0
Durchschn. Blockvolumen [m <sup>3</sup> ]	0,06
Durchschn. Blockgewicht [kg]	160
Durchschn. Blockoberfläche [m <sup>2</sup> ]	0,8
Durchschn. Gewicht instabiler Blöcke [kg]	17

Daraus ergibt sich eine theoretische, instabile Last von 595 kg mit einem Volumen von 0,22 m<sup>3</sup> (bei einer Dichte von 2700 kg/m<sup>3</sup>). Das Histogramm des Sicherheitsfaktors erlaubt einen weiteren Einblick in die Stabilität des Systems (Abbildung 6.29). Der größte Anteil fällt auf einen hohen Sicherheitsfaktor mit einem Wert größer/gleich 100. Eine weitere Häufung findet sich im Bereich von <1. Dort sind die instabilen Blöcke vorzufinden. Einige Blöcke finden sich im Bereich zwischen 1 und 100. Sie gelten zwar als noch stabil, sind aber beispielsweise bei leichten Veränderungen dieses instabilen Gleichgewichtszustandes potentiell rutschungsgefährdet.

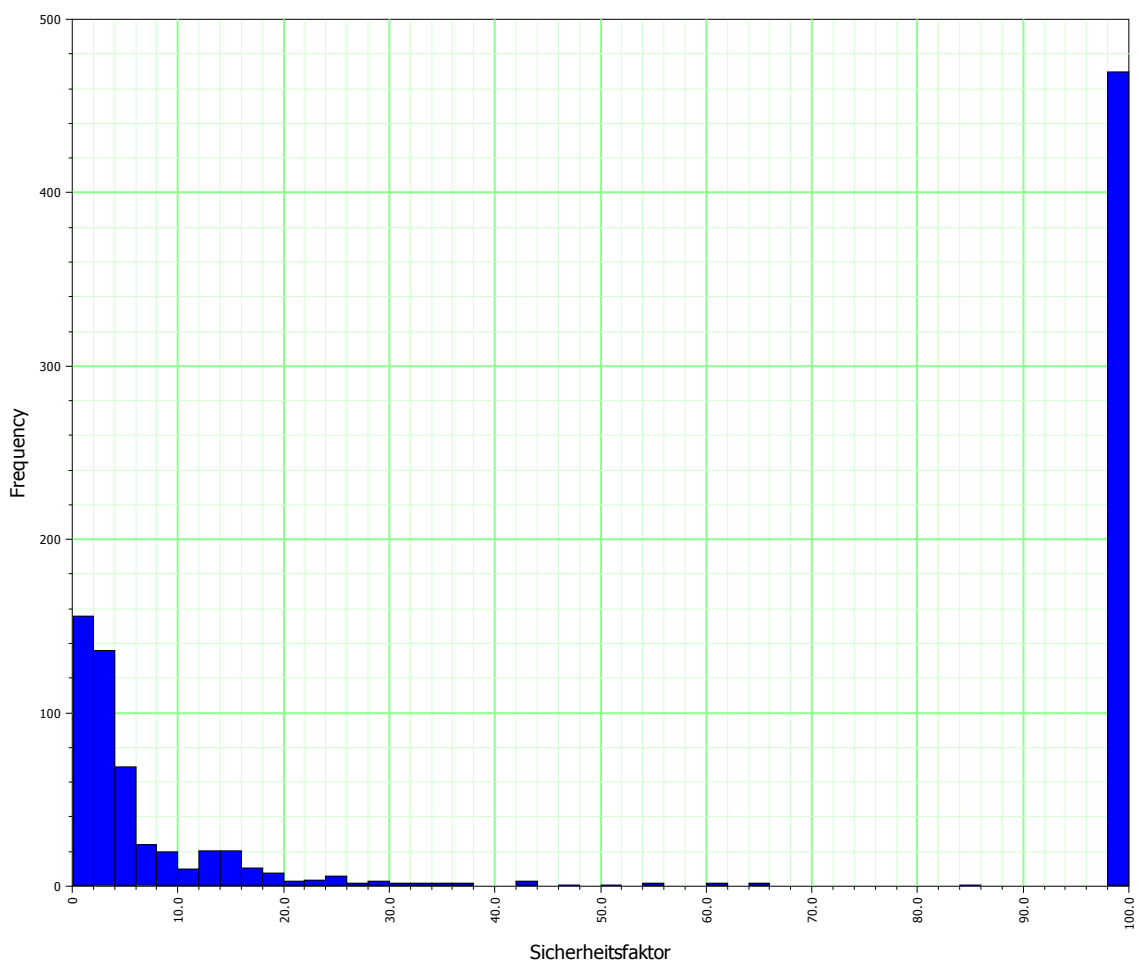
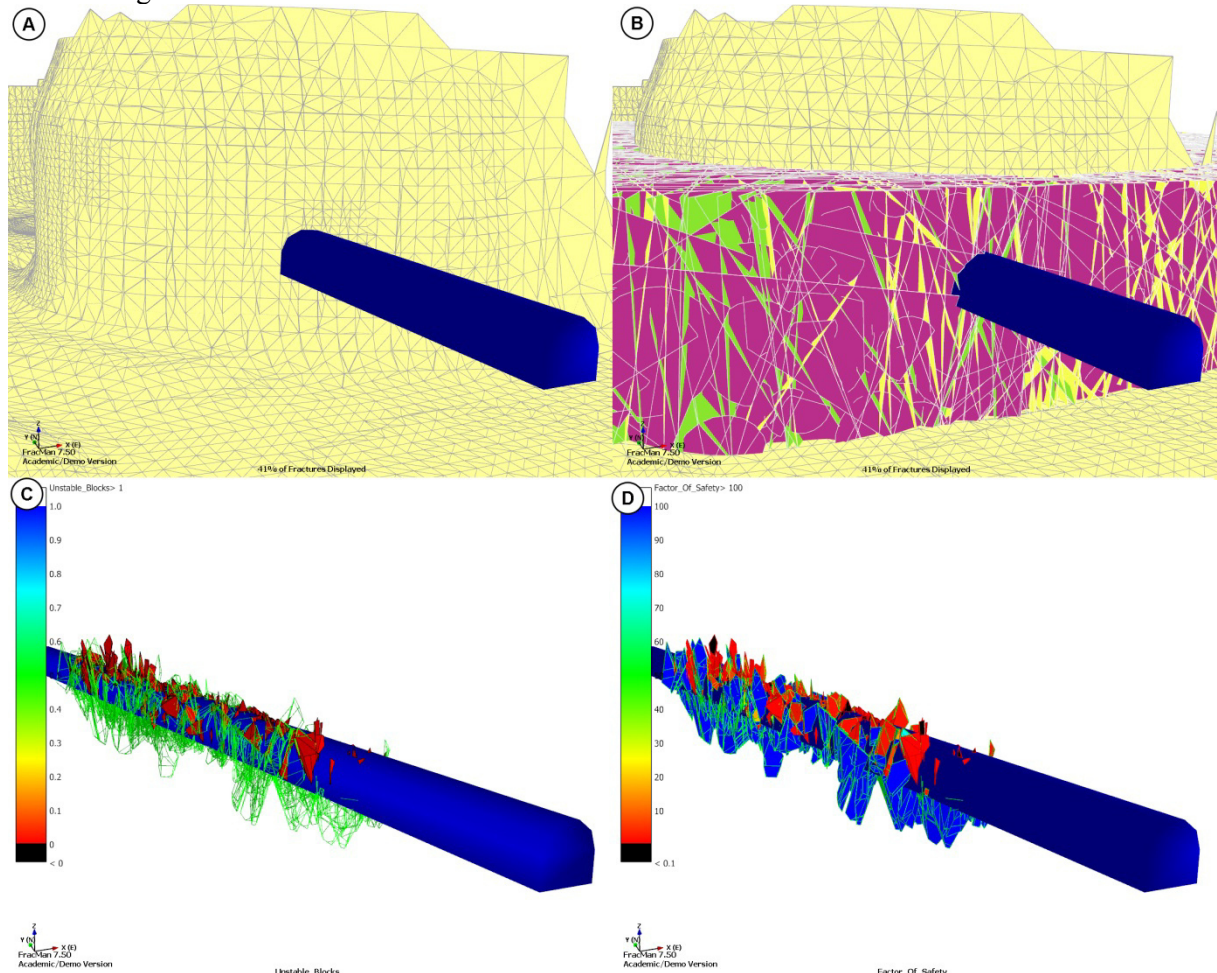


Abbildung 6.29 Histogramm der berechneten Sicherheitsfaktoren der Hangstabilitätsberechnung am DFN Modell des Steinbruchs Eberstadt.



### ***Tunnelstabilitäten am Beispiel des DFN Modells Eberstadt***

Analog zur Hangstabilität wird am gleichen DFN Modell des Steinbruchs Eberstadt auch die Tunnelstabilität dargestellt. Dazu wird hypothetisch ein Tunnel durch den Steinbruch und das DFN Modell gelegt (Abbildung 6.30 A). Anders als beim Beispiel des Hanges schneidet der Tunnel nur durch den unteren Bereich des DFN Modells und somit nur durch die beiden dort vorkommenden Kluftscharen und die Schichtung. Der obere Bereich bleibt unberücksichtigt (Abbildung 6.30 B). Im Gegensatz zur Berechnung der Hangstabilität wird hier das DFN Modell nicht verkleinert, da die Kontaktfläche mit dem Tunnel von sich aus sehr klein ist. Das digitale Höhenmodell spielt bei dieser Berechnung keine Rolle.



**Abbildung 6.30** Visuelle Darstellung der Stabilität der Blöcke um einen hypothetischen Tunnel. A – Konstruktion einer Tunnelröhre durch das Modell des Steinbruchs Eberstadt. B – Der Tunnel schneidet nur den unteren Bereich des DFN Modells, bestehend aus einer Schichtung und 2 Hauptkluftrichtungen; der obere Bereich bleibt unberücksichtigt. C – Darstellung instabiler (rot) und stabiler Blöcke (grün) an der Tunnelröhre. Die instabilen Bereiche liegen stets im oberen Bereich des Tunnels. D – Farbliche Darstellung des Sicherheitsfaktors. In Blau sind die stabilsten Blöcke dargestellt, in Rot wieder die instabilen.

In Abbildung 6.30 C sind alle berechneten Blöcke dargestellt und in Rot die instabilen Bereiche markiert. Oberhalb des Tunnels befindet sich eine hohe Anzahl jener instabilen Blöcke, während an den Seiten kaum mit Problemen zu rechnen ist. Die beiden Hauptkluftrichtungen stehen fast saiger, daher ist es nicht verwunderlich, dass diese potentiell rutschungsgefährdet sind, wenn ein Tunnel diese horizontal durchschneidet. Die Flächen stehen senkrecht auf dem Dach des Tunnels. Der Sicherheitsfaktor aller Blöcke bestätigt die Beobachtungen (Abbildung 6.30 D). Viele Blöcke sind dort rot markiert und damit instabil. Nur die blauen Blöcke können als stabil angesehen werden. Insgesamt werden 2791 Blöcke entlang des Tunnels identifiziert, davon sind 2005 stabil, 697 instabil und 89 befinden sich sogar im freien Fall (Tabelle 6.20).

Tabelle 6.20 Die Ergebnisse der Stabilitätsanalyse für die Verschneidung des DFN Modells mit einem Tunnel im Steinbruch Eberstadt.

Parameter	Wert
Anzahl Blöcke	2791
Stabile Blöcke	2005
Instabile Blöcke	697
Blöcke im „Freien Fall“	89
Durchschn. Blockvolumen [m <sup>3</sup> ]	0,3
Durchschn. Blockgewicht [kg]	824
Durchschn. Blockoberfläche [m <sup>2</sup> ]	2,6
Durchschn. Gewicht instabiler Blöcke [kg]	25
Durchschn. Gewicht Freier-Fall-Blöcke [kg]	26

Im Schnitt wiegen die instabilen Blöcke 25 kg, was einer gesamten instabilen Last von 17425 kg entspricht. Das durchschnittliche Gewicht der instabilen Blöcke ist geringfügig höher, liegt bei 26 kg und entspricht einer Gesamtlast von 2314 kg. Das durchschnittliche Blockgewicht der Blöcke insgesamt ist deutlich höher und beträgt 824 kg.

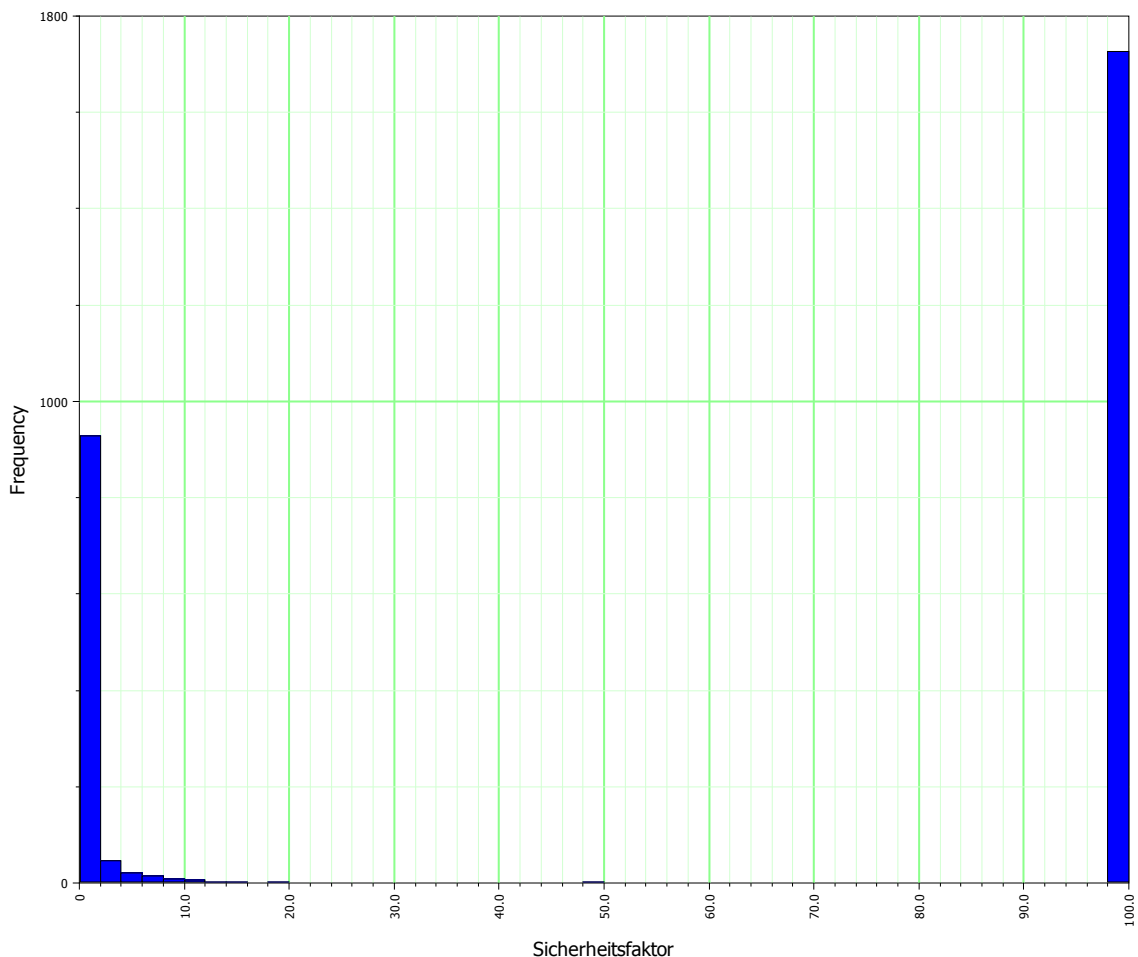


Abbildung 6.31 Histogramm der berechneten Sicherheitsfaktoren der Tunnelstabilitätsberechnung am DFN Modell des Steinbruchs Eberstadt.

Das Histogramm des Sicherheitsfaktors ist in diesem Beispiel viel deutlicher als bei der Analyse der Hangstabilität. Eine hohe Anzahl Blöcke ist sicher ( $SF < 100$ ) und nur wenige instabil ( $SF < 1$ ). Im Wertebereich dazwischen liegen aber kaum Blöcke, die Verteilung ist sehr eindeutig und die Blöcke sind klar als stabil bzw. instabil definiert.

### ***Diskussion***

Die Quantifizierung der Hangstabilität mit Fracman ist sehr rechenaufwendig. Die Darstellung aller Blöcke entlang einer Oberfläche ist daher sehr zeitintensiv. Es empfiehlt sich stets eine Simplifizierung derjenigen Oberfläche, an der die Stabilitätsuntersuchung stattfindet. Darum ist in dieser Arbeit das digitale Höhenmodell des Aufschlusses auf ein Minimum vereinfacht. Auch die Nutzung einer Ausgleichsebene, die die Böschungsgeometrie widerspiegelt, ist eine Option. Aufgrund der hohen Anzahl von Trennflächen und Klüften in einigen Modellen kann es ratsam sein, Trennflächen unterhalb einer bestimmten Größe herauszunehmen. Kleinste Klüfte beeinflussen die Berechnungen nur wenig, da aus ihnen nur selten und überwiegend kleine Blöcke gebildet werden. Diese Maßnahme verringert die Rechenzeit.

Gegenüber den konventionellen Stabilitätsanalysen wird auch die Größe, Form und Intensität der Trennflächen berücksichtigt. Sowohl deterministische als auch stochastische Eingabeparameter werden genutzt. Die multiple Durchführung der Analyse auf der Grundlage mehrfach entwickelter DFN Modelle führt zu einer Wahrscheinlichkeitsverteilung der unterschiedlichen Stabilitätsanalysen.

Die Hangstabilitätsanalyse offenbart, dass kaum Rutschungspotential besteht. Nur wenige Blöcke sind rutschungsgefährdet. Dies liegt vor allem in den fast saiger stehenden Hauptklüftungen und der horizontalen Schichtung begründet. Da der Abbau in dem Steinbruch auch nahezu senkrecht erfolgt, ist das Rutschungspotential sehr gering, da der Winkel zwischen Böschung und Trennfläche minimiert ist. Anders sieht die Analyse der Tunnelstabilität aus. Gerade hier sind viele Blöcke instabil, da die Klüfte senkrecht auf dem Tunneldach liegen und so ein Abrutschen enorm begünstigen.

Die hier vorgestellte Methode eignet sich hervorragend in Kombination mit einem terrestrischen Laserscanner. In Tunneln - entlang von Straßen oder Hängen - können mit dem Laserscanner viele Daten über die Trennflächen gesammelt werden und in ein DFN Modell gewandelt werden. Auf dieser Grundlage ist eine genaue Berechnung der Stabilitäten entlang von Hängen oder eines Tunnels einfach möglich.

### 6.6.7 Blockgröße aus DFN Modellen

Es ist mit einfachen Mitteln möglich die durch Trennflächen begrenzte Durchschnittsblockgröße aus einem DFN Modell zu berechnen. Die Durchschnittsgröße ist aber noch kein Maß für die Wirtschaftlichkeit, denn diese wird durch die Rohblockhöflichkeit unter der Annahme bestimmter Mindestanforderungen an den Block bestimmt (Singewald 1992) (Kapitel 2.8.1). Diese ergeben sich aus dem angestrebten Volumen und den zugehörigen Kantenlängen. Die Berechnungen sind nur für 3 orthogonale Trennflächenscharen möglich, meist eine horizontale Schichtung und 2 vertikale Scharen. Eine Aussage über die durchschnittliche Größe von Blöcken wird auch durch die Anwendung des „Rock Quality Designation“ (RQD) oder Volumetric Joint Count ( $J_v$ ) (Kalenchuk et al. 2006) erreicht. Diese Angaben sind in Bezug auf das Volumen der Blöcke und dessen Verteilung ungenau und liefern keine Aussage über die geometrische Form der Blöcke. Die Form der Blöcke liefert zusätzlich Aussagen über die Stabilität von Hängen und die im Tunnelvortrieb.

Die Berechnung der Blockgrößen und zusätzlich der Form dieser Blöcke spielt eine große Rolle bei der Evaluierung des „Dual-Porosity-Verhaltens“ eines simulierten Reservoirs. Die Größe der Blöcke, ihre Form und die sich daraus ergebende Oberfläche kontrollieren die Durchflussrate und Durchflussmenge von Fluiden zwischen Matrix und Trennflächengefüge (Golder Associates 1999-2015). Solch eine direkte Auswertung der Blöcke zur Bewertung des Austauschverhaltens von Matrix zu Trennfläche ist genauer als die typische Anwendung des Sigmafaktors. Ein Nachteil ist die maximal mögliche Modellgröße zur Berechnung. Insgesamt kann die Berechnung der Blockgröße nur für kleinere Modelle angewandt werden.

### 6.6.8 Blockgrößen in Fracman

Aus den DFN Modellen können über zwei Methoden die aus den Trennflächen definierten Gesteinsblöcke im Hinblick auf ihr Volumen und teilweise auf ihre Form quantifiziert werden. In den folgenden Kapiteln werden die beiden unterschiedlichen Methoden am Beispiel des DFN Modells des Steinbruchs Eberstadt vorgestellt. Dabei handelt es sich um einen Multi-Dimensional-Spacing-Algorithmus (MDS) und ein Fragmentierungsraaster, das über das DFN Modell gelegt wird.

#### **MDS**

Ein in Fracman integrierter Algorithmus zur Ermittlung der Blockgrößen ist das Multi-Dimensional-Spacing (MDS). Es ähnelt der Berechnung der Rohblockhöflichkeit. Bei diesem Verfahren werden Abstände zwischen Klüften quantifiziert. Dies erfolgt entlang von Strecken in 3 orthogonal zueinander liegende Raumrichtungen. Aus der Multiplikation der Abstände aller 3 Richtungen werden Volumina abgeschätzt. Das so berechnete Volumen wird als Sigma-Volumen bezeichnet, da die Methode der Berechnung der des Sigma-Faktors gleicht. Die einzelnen Volumina sind das Äquivalent zu den Blockgrößen (FracMan® Fractured Reservoir Analysis & Modelling 2013, Golder Associates 1999-2015).

Mit Hilfe des MDS-Algorithmus werden am Beispiel des Aufschlusses Eberstadt die Blockgrößen bzw. Volumina abgeschätzt. Der Arbeitsprozess setzt sich aus folgenden Abschnitten zusammen:

- Erstellung eines Rasters über dem DFN Modell. Das Raster hat eine Größe von  $50 \times 50 \times 40$  Zellen ( $x \times y \times z$ -Richtung). Die Größe der Rasterzellen sollte ungefähr dem Vierfachen des durchschnittlichen Kluftabstands entsprechen (FracMan® Fractured Reservoir Analysis & Modelling 2013).
- Berechnung der Abstände in 3 Raumrichtungen. Die Raumrichtungen können dabei frei definiert werden. Zusätzlich wird die Anzahl zufälliger Punkte im Raum festgelegt, von denen aus die Abstände sowie die Anzahl an Schnittpunkten (bzw. Blöcken), nach denen die Berechnung entlang einer Strecke endet, bestimmt werden.
- Die Ergebnisse (Sigmalänge  $x$  ( $S_x$ ), Sigmalänge  $y$  ( $S_y$ ) und Sigmalänge  $z$  ( $S_z$ )) der durchschnittlichen Abstände werden zum Sigmaprodukt multipliziert.

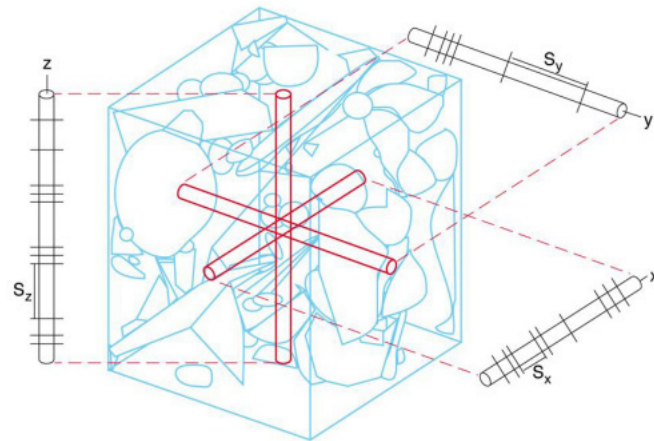


Abbildung 6.32 Schematische Darstellung des MDS-Algorithmus. Drei orthogonal zueinander liegende Röhren (rot) werden erstellt und die Abstände in 3 Raumrichtungen quantifiziert ( $S_x$ ,  $S_y$ ,  $S_z$ ) (aus Golder Associates 2015).

Die Multiplikation der Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Abstände erfolgt über eine Monte-Carlo-Simulation. Das Ergebnis ist eine Häufigkeitsverteilung der Blockvolumina. Dazu werden Abstände in allen 3 Raumrichtungen an unterschiedlichen Punkten gewonnen. Für das Modell Eberstadt werden insgesamt 100 im Raum verteilte Punkte genutzt und Abstände bis zu 100 Blöcken entlang der Strecken ermittelt. Die Ergebnisse der Volumina der Blöcke sind als Histogramm (Abbildung 6.33) und in der Tabelle 6.21 dargestellt.

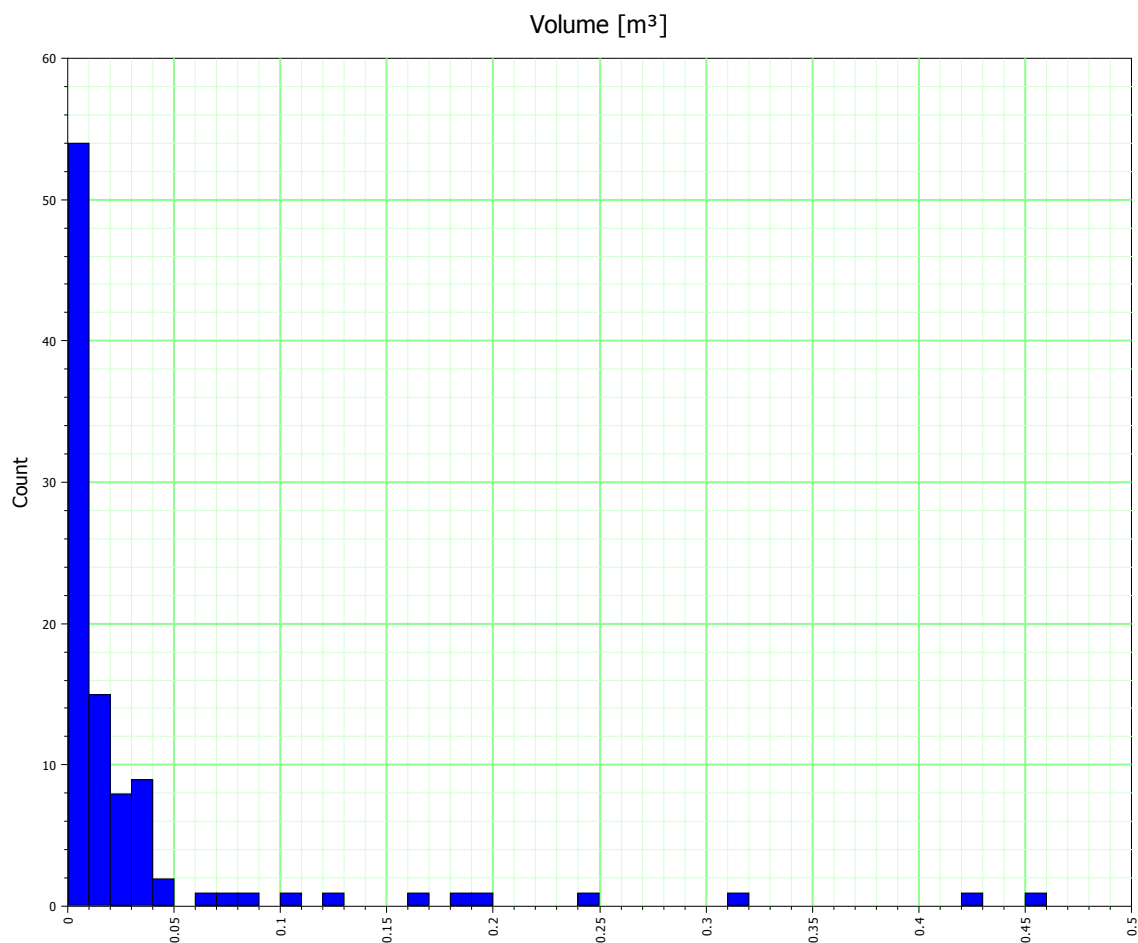


Abbildung 6.33 Histogramm der berechneten Volumina aus dem MDS-Algorithmus. Kleine Volumina unter  $0,01 \text{ m}^3$  überwiegen, nur vereinzelt treten Volumina größer als  $0,05 \text{ m}^3$  auf und erreichen einen Maximalwert von  $0,45 \text{ m}^3$ .

Der Hauptanteil der berechneten Volumina hat einer Größe von weniger als 0,01 m<sup>3</sup>. Volumen größer als 0,05 m<sup>3</sup> treten nur selten auf und sie erreichen einen Maximalwert von 0,45 m<sup>3</sup>. Die Werte ergeben sich aus den Berechnungen der Abstände in 3 Raumrichtungen. Der mittlere Abstand ist jeweils in Tabelle 6.21 angegeben. Diese erreichen in S<sub>y</sub> Richtung ihren Maximalwert von 0,47 m und ihren Minimalwert in S<sub>x</sub> Richtung mit 0,29 m. Aus der Multiplikation der 3 Werte ergibt sich das mittlere MDS-Volumen von 0,034 m<sup>3</sup>. Die Ergebnistabelle bestätigt die Histogrammdarstellung, dass keiner der Werte oberhalb von 0,45 m<sup>3</sup> liegt. Zusätzlich wird aus den Ergebnissen dieses Algorithmus ein Sigma-Faktor (Sigma-Mittel) berechnet. Diese Berechnung erfolgt analog zu der Berechnung in Kapitel 6.5.2 mit Formel 6.14 (Golder Associates 2014).

**Tabelle 6.21 Ergebnisse des MDS-Algorithmus. Angegeben sind die mittleren Abstände in alle 3 Raumrichtungen, der mittlere Sigmafaktor und die mittlere Größe der Volumina.**

Parameter	Wert
S <sub>x</sub> Abstand [m]	0,29
S <sub>y</sub> Abstand [m]	0,47
S <sub>z</sub> Abstand [m]	0,30
Sigma-Mittel	104412
MDS-Volumen [m <sup>3</sup> ]	0,034
Volumen > 1 m <sup>3</sup> [%]	0
Volumen > 2 m <sup>3</sup> [%]	0

Bei dieser Methode wird ein Raster definierter Größe über das DFN Modell gelegt. Einzelne Rasterzellen werden zu Blöcken zusammengefasst. Das erfolgt durch eine Beurteilung der Trennflächen innerhalb jeder Rasterzelle. Benachbarte Rasterzellen werden zu einem Block zusammengefasst, wenn innerhalb dieser Zellen keine begrenzenden Trennflächen vorkommen. Sobald in einer Raumrichtung eine Zelle mit einer begrenzenden Trennfläche auftritt, ist die Zellzusammenlegung abgeschlossen und ein Block entsteht, der repräsentativ für einen möglichen Gesteinsblock steht. Die maximale Größe des Rasters ist hierbei auf 150\*150\*150 Zellen begrenzt (FracMan® Fractured Reservoir Analysis & Modelling 2013). Es empfiehlt sich während der Evaluierung - aufgrund der hohen Rechenintensität - mit kleinen Rastern zu beginnen, bis die minimal benötigte Zellgröße festgelegt werden kann. Zudem ist es ratsam, die Blockgröße an den Trennflächenabstand anzugleichen. Diese sollte ungefähr 25% des durchschnittlichen Abstands betragen. Das Ergebnis dieser Vorgehensweise ist die Darstellung einzelner Blöcke im Raster, berechnete Volumina und Gewichte dieser Blöcke, sowie zwei weitere Faktoren, die einen Aufschluss über die Form der Blöcke geben können. Diese sind der „Shape“-Faktor  $\alpha_s$  und der Kollinearitätsfaktor  $\beta_s$  (Golder Associates 2015). Der Faktor  $\beta_s$  beschreibt die Kollinearität der längsten Vertex-Verbindung (Verbindung der längsten Strecke zwischen Eckpunkten der Form) und  $\alpha$  das Verhältnis zwischen Oberfläche der Form, der durchschnittlichen Distanz zwischen den Eckpunkten der Form und des Volumens (Kalenchuk 2006).

$$\alpha_s = \frac{A_B * j}{7,7 * V_B} \quad 6.40$$

$$\beta_s = 10 \left[ \frac{\sum (a * b)^2}{\sum \|a\|^2 \|b\|^2} \right]^2 \quad 6.41$$

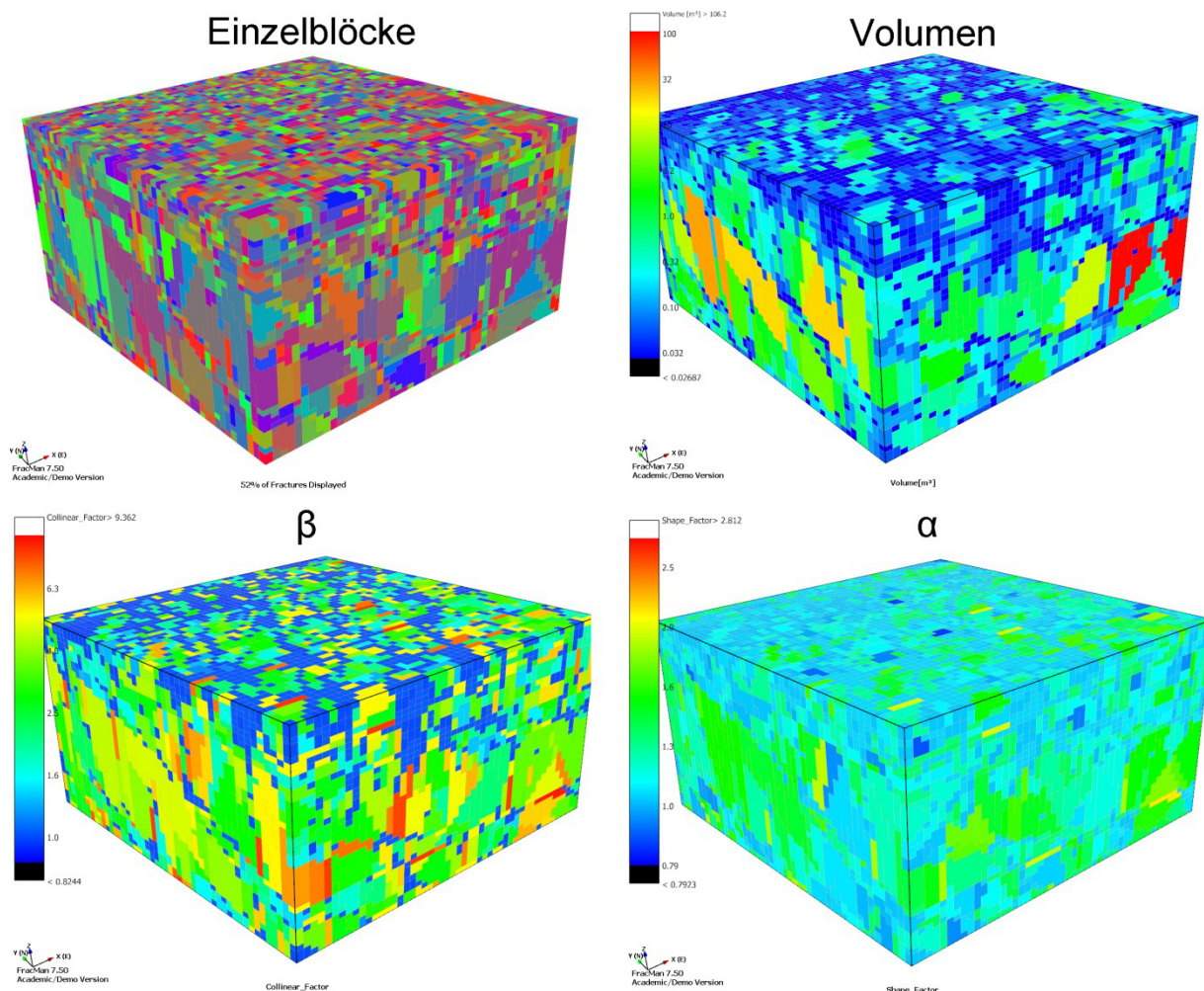
Die Variable  $A_B$  ist die Oberfläche des Blocks [m<sup>2</sup>],  $j$  die durchschnittliche Distanz zwischen Eckpunkten [m],  $V_B$  das Volumen des Blocks [m<sup>3</sup>] und  $a$  und  $b$  die Vektoren der am weitesten zueinander entfernten Eckpunkte des Blocks.

Der Shape-Faktor spiegelt die Flachheit eines Blocks wider. Ein perfekter Würfel hat einen Shape-Faktor von 1. Das Seitenverhältnis steigt proportional mit der Größe des Shape-Faktors (Golder Associates 2015). Polyeder mit mehr als 6 Seiten weisen Werte zwischen 0,52 und 1 auf. Der



Kollinearitätsfaktor beträgt für einen perfekten Würfel 0,82. Für langgezogene Formen beträgt der Wert annähernd 10. Die Kombination beider Faktoren ist unerlässlich, um eine Aussage über die Blockform zu treffen. Durch Eintragen beider Faktoren in ein Block-Form-Diagramm kann die Form der Blöcke charakterisiert werden (Abbildung 6.35) (Kalenchuk 2006).

Der Algorithmus wird anhand des DFN Modells des Steinbruchs Eberstadt erprobt. Dazu wird ein Raster der Größe 50\*50\*40 Zellen erstellt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.34 visualisiert. Dort sind alle erstellten Einzelblöcke sowie deren Volumen farblich dargestellt. Ein Großteil der Blöcke hat geringe Volumen (blau) und nur wenige Blöcke hohen Volumens können innerhalb des Modells gefunden werden (gelb bis rot eingefärbt). Weiterhin sind die Werte des Kollinearitäts- und Shape-Faktors dargestellt. Für den Shape-Faktor  $\alpha_s$  überwiegen niedrige Werte zwischen 1 und 1,6, was per Definition auf eine nahezu kubische Form schließen lässt. Die Variation des Kollinearitätsfaktors  $\beta_s$  ist höher und liegt überwiegend zwischen 1 und 3, was ebenso eher auf eine kubusähnliche Form schließen lässt.



**Abbildung 6.34** Visualisierung der Ergebnisse der Blockgrößenbestimmung. Die Einzelblöcke können farblich unterschieden werden. Die Darstellung der Volumina zeigt deutlich viele kleine Blöcke im oberen Bereich des Modells und wenige große Blöcke in der Mitte. Der Kollinearitätsfaktor  $\beta_s$  zeigt viele kubische, aber auch vereinzelt längliche Blöcke, während die Variabilität des Shape-Faktors  $\alpha_s$  geringer ist und komplett im kubischen Bereich liegt.

Das Eintragen der beiden Faktoren in das Block-Form-Diagramm bestätigt diese Annahmen (Abbildung 6.35). Dort sind die Durchschnittswerte der Faktoren eingetragen, diese liegen eindeutig im kubischen Feld. Für einige Blöcke liegt der Kollinearitätsfaktor allerdings außerhalb des kubischen Feldes, so ist deren Form einem länglichen Quader ähnlicher (für Werte von  $\beta_s > 4$ , in Abbildung 6.34 in Orange und Rot markiert).

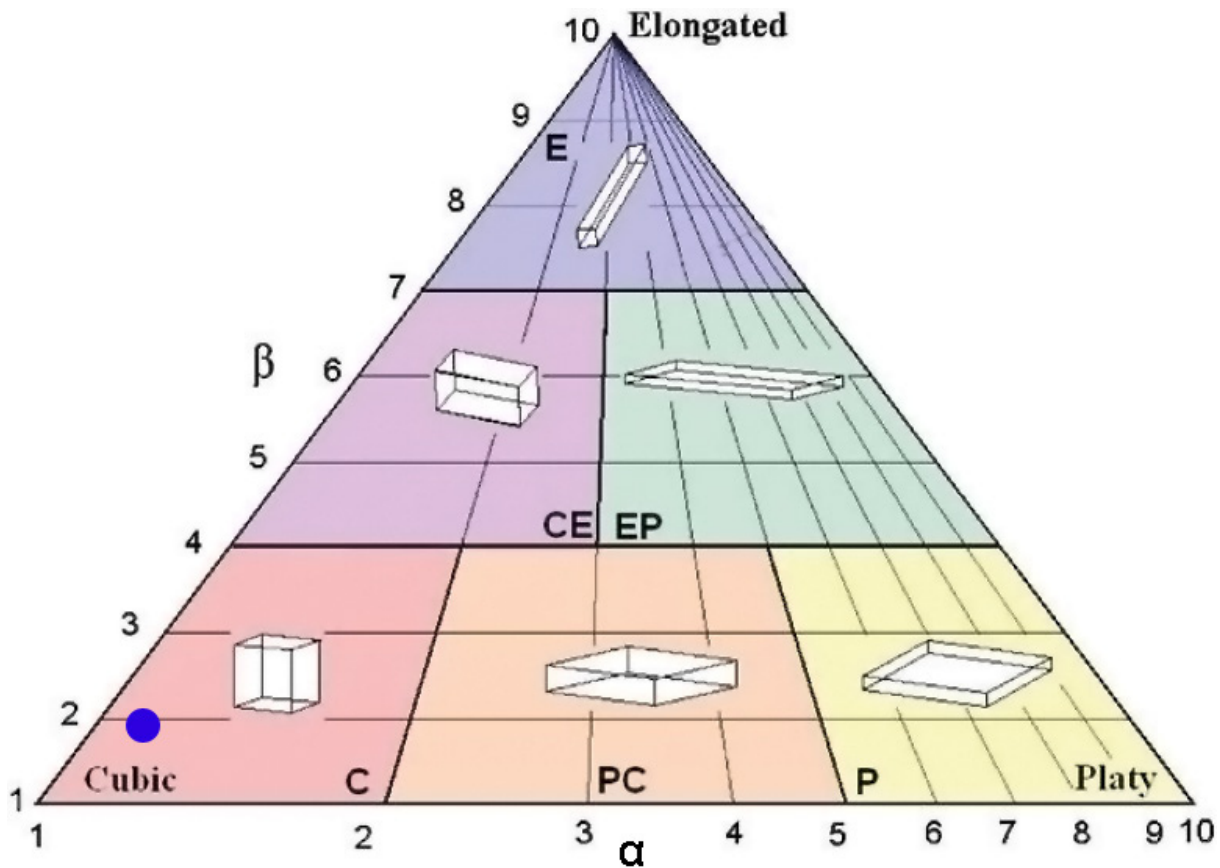


Abbildung 6.35 Das Blockformdiagramm nach {Kalenchuk 2006}. In Blau ist das Ergebnis der Auswertung eingetragen, das die Durchschnittswerte des Shape-Faktors  $\alpha$  und des Kollinearitätsfaktors  $\beta$  anzeigt. Im Mittel kann die Form der Blöcke als durchweg kubisch (cubic) angenommen werden.

Die Ergebnisse der gesamten Auswertung sind in Tabelle 6.22 dargestellt. Das durchschnittliche Blockvolumen beträgt  $0,123 \text{ m}^3$ , das zugehörige Gewicht  $332 \text{ kg}$  und die Oberfläche der Blöcke liegt im Schnitt bei  $1,38 \text{ m}^2$ . Die Rasterzellen haben ein Ausgangsvolumen von  $0,02 \text{ m}^3$ , kleinere Blockvolumen sind also nicht detektierbar. Innerhalb der 100000 Rasterzellen werden 21826 Blöcke identifiziert, von denen 1,45% größer als  $1 \text{ m}^3$  und 0,55 % größer als  $2 \text{ m}^3$  sind.

Tabelle 6.22 Ergebnisse der Blockgrößenauswertung mithilfe des Fragmentierungsrasters.

Parameter	Wert
Durchschn. Volumen [ $\text{m}^3$ ]	0,123
Durchschn. Gewicht [kg]	332
Durchschn. Oberfläche [ $\text{m}^2$ ]	1,38
Shape Faktor $\alpha_s$	1,1
Kollinearitätsfaktor $\beta_s$	1,93
Boxvolumen [ $\text{m}^3$ ]	2686
Anzahl Zellen	50*50*40
Volumen pro Zelle [ $\text{m}^3$ ]	0,02
Anzahl Blöcke	21826
Zellen > $1 \text{ m}^3$ [%]	1,45
Zellen > $2 \text{ m}^3$ [%]	0,55

Dieser Trend wird durch die Histogrammdarstellung in Abbildung 6.36 bestätigt. Der größte Anteil der Volumen ist geringer als  $0,1667 \text{ m}^3$ . Nur vereinzelt haben Blöcke ein Volumen von mehr als  $0,33 \text{ m}^3$ .

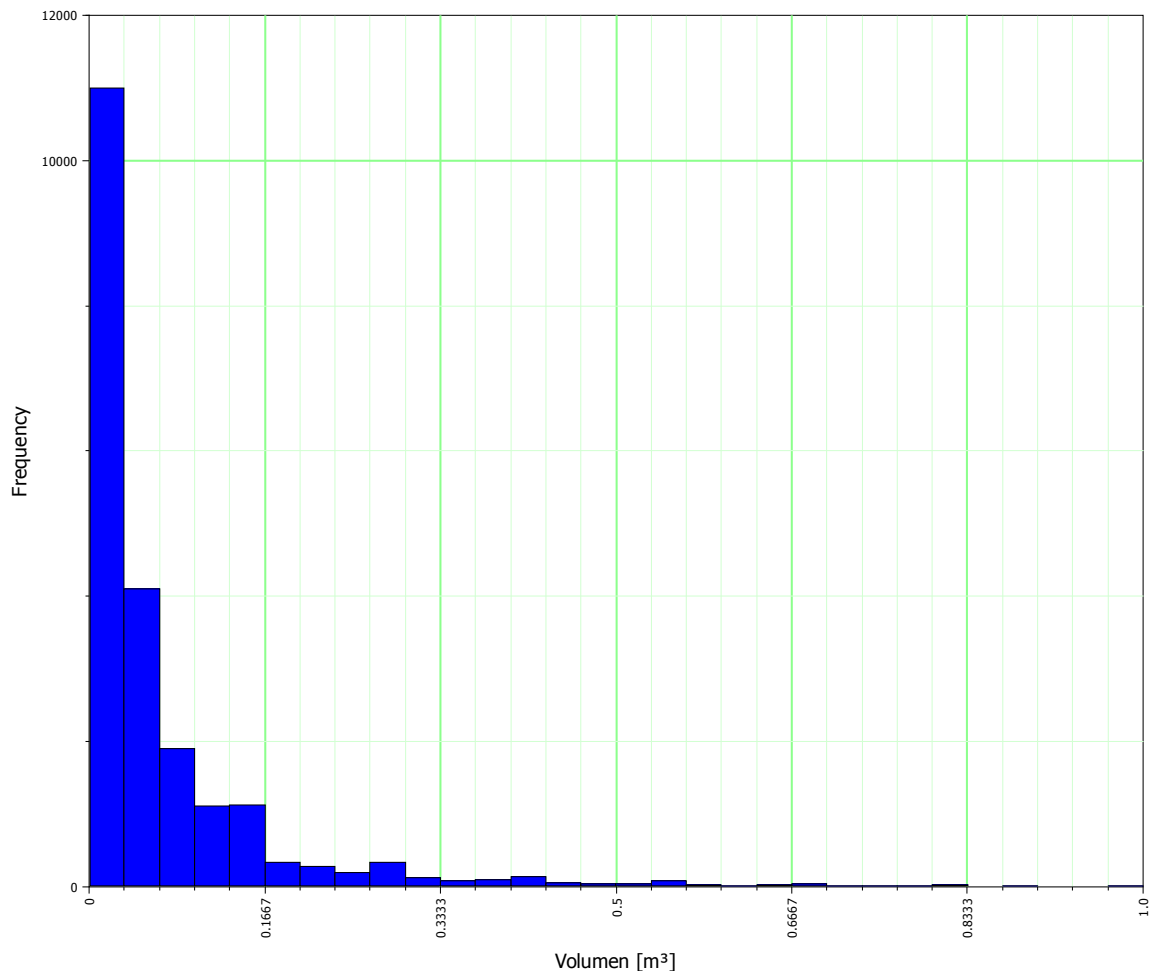


Abbildung 6.36 Histogrammdarstellung der mithilfe des Fragmentierungsrasters berechneten Volumen. Nur wenige Volumen sind größer als 0,1667 m³.

### ***Diskussion - Vergleich von MDS und Fragmentierungsraster***

Der MDS-Algorithmus ist eine sehr schnelle Methode zur Berechnung der Volumen. Das Fragmentierungsraster ist deutlich rechenintensiver. Weiterhin ist die maximale Größe des Rasters bei der letztgenannten Methode auf  $5 \cdot 10^6$  Rasterzellen begrenzt. Je nach Größe der Blöcke und des Modells können Blöcke nicht identifizierbar sein. Allerdings bietet nur die Fragmentierungsraster-Methode die Möglichkeit, die Form der Blöcke zu bestimmen. In dieser Hinsicht ist die Methode alternativlos.

Die Ergebnisse beider Methoden unterscheiden sich voneinander. Das durchschnittliche Volumen des MDS-Algorithmus beträgt 0,034 m³, beim Fragmentierungsraster hingegen 0,02 m³. Obwohl das Durchschnittsvolumen bei der MDS Methode höher ist, gibt es dort keine Volumen oberhalb von 1 m³. Jedoch sind beim Fragmentierungsraster 1,45% der Blöcke größer als 1 m³. Bereits im Zuge der Hangstabilität werden Blockgrößen berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.19 und Tabelle 6.20 zu finden. Dort liegt das Volumen mit 0,03 m³ deutlich über den Ergebnissen der MDS Methode und im Bereich der Methode des Fragmentierungsrasters. Die für die Stabilitäten genutzten Algorithmen sind die genauesten bei der Blockgrößencharakterisierung, bilden sie doch am idealsten einen von Trennflächen begrenzten Block ab. Die Methode ist aber extrem rechen- und zeitintensiv und kann nicht für das gesamte Modell angewendet werden. Die MDS Methode ist trotz ihrer hohen Geschwindigkeit eher ungenau. Es empfiehlt sich immer die Anwendung des Fragmentierungsrasters, da nur dieses Aussagen über die Blockform zulässt.

## 7 Diskussion

In dieser Arbeit wird ein verbesserter Arbeitsablauf zur (halb-)automatischen Extraktion von Trennflächenparametern, der Orientierung, Intensität und Größe, aus Punktwolken vorgestellt. Die so gewonnenen Datensätze werden zur Erstellung eines Discrete Fracture Network Modells genutzt, auf dessen Grundlage geomechanische und hydraulische Parameter berechnet werden.

Für jeden der 3 genannten Parameter werden ein ausgiebiger Arbeitsprozess und verschiedene Möglichkeiten der Auswertung dargelegt als auch innerhalb dieser Kapitel diskutiert. Für eine detaillierte Diskussion bezüglich der Methodik sei an dieser Stelle explizit auf die besagten Kapitel verwiesen. Gleiches gilt für die DFN Modellerstellung, die das zweite große Kapitel der hier vorliegenden Arbeit inhäriert/beinhaltet.

### 7.1 Zusammenfassende Diskussion der Methodik

Viele Vor- und Nachteile stecken im Detail der Methodik, jedoch gibt es auch allgemeingültige Aussagen und Probleme, die hier diskutiert werden sollen. Da die Auswertung der Parameter nur auf einer Datenquelle beruht, muss für eine hohe Datenqualität gesorgt werden, zudem müssen Fallstricke in der Anwendung bekannt sein.

Alle vorgestellten Methoden sind direkt von der Auflösung der Punktwolken abhängig. Eine falsch gewählte (zu niedrige) Auflösung führt zu Verzerrungen in den Ergebnissen. Allgemein sind in den folgenden Unterkapiteln (7.2 und 7.3) die Verzerrungen durch den Prozess des Laserscannings aber auch der reinen Trennflächenaufnahme aufgeführt. Probleme, die sich durch die händische Aufnahme ergeben, werden meist auf die entwickelten automatischen Methoden übertragen. Beschränkt wird die Genauigkeit der Daten schon zu Beginn von der Genauigkeit und Präzision der Hardware. Diese liegt im hier angewandten Laserscanner bei ungefähr 5 bzw. 3 mm. Unterhalb dieser Schwelle ist eine Aussage über Genauigkeit im Modell nicht möglich. In diesem Maßstabsbereich kann keine Aussage über Trennflächenparameter getroffen werden.

Oft wurden in der Literatur Vergleiche zwischen händischen Messungen und der Auswertung aus Punktwolken gezogen, die eine Eignung des Systems darlegen und die Ergebnisse aus den Auswertungen sowohl im Bereich der Orientierungsauswertung als auch einer manuellen Abstands- und Größenbestimmung der Trennflächen bestätigen (bspw. Becker et al. 2014, Sturzenegger et al. 2011, Fekete et al. 2010).

Fehler und Ungenauigkeiten in den ersten Auswerteschritten übertragen sich zwangsläufig auch in das resultierende DFN Modell und können im Nachhinein nicht mehr mit den Ausgangsdaten abgeglichen werden. Eine Validierung der Daten muss separat für jeden Bearbeitungsschritt erfolgen und obliegt oft der Erfahrung des Bearbeiters.

Die Methoden sind abhängig von der Qualität der Punktwolkenmodelle. Die Registrierung der Punktwolken muss eine hohe Genauigkeit vorweisen, da es sonst zu künstlichen Unebenheiten auf der Oberfläche kommt, wodurch Algorithmen der Flächenerkennung potentiell versagen. Ein Versagen wird auch durch eine unzureichende Bereinigung der Oberfläche von Artefakten und Vegetation verursacht.

Alle vorgestellten Methoden beruhen auf der Punktwolke und erfordern keine vorherige Triangulation der Daten. Mögliche Vereinfachungen der Oberfläche durch die Triangulation oder eine Abnahme der ursprünglichen Auflösung werden so vermieden. Oft stellen triangulierte Oberflächen eine sehr starke Vereinfachung der Ausgangspunktwolke dar. Triangulationen müssen eine sehr hohe Qualität und Detailtreue aufweisen.

Die richtige Wahl kontrollierender Parameter bei der Flächenidentifizierung, die Voraussetzung für alle gezeigten Methoden ist, bedarf der Erfahrung des Bearbeiters und ist abhängig von der Beschaffenheit des Aufschlusses und der Qualität des Modells. Eine hohe Anzahl von Schattenbereichen und niedrigen Punktdichten erschweren die Flächenerkennung.

Einer der wichtigsten Punkte der gesamten Flächenerkennung und der darauf basierenden Methodik ist die Frage, ob es sich bei den untersuchten Strukturen und Oberflächen wirklich um Trennflächen handelt. Nicht jede als planar zu erkennende Fläche spiegelt zwangsläufig eine Trennfläche wider. Auch Schuttfächer mit glatter Oberfläche werden von automatischen Algorithmen als Flächen erkannt und fließen ungewollt in die Auswertung ein. Vor der Auswertung kann die Krümmung und Rauigkeit

des Punktwolkenmodells durch die Software CloudCompare berechnet und Bereiche hoher Krümmung und Rauigkeit entfernt werden. So erhält man vor Anwendung der Algorithmen fast ausschließlich planare Punktwolkenbereiche. Weitere planare Bereiche, die keine Trennflächen darstellen, können aber nur manuell im Auswerteprozess gelöscht werden (vgl. Kapitel 6.4.5).

### 7.1.1 Orientierung

Wie im Kapitel 5.1 aufgezeigt, existieren unterschiedliche Methoden zur Bestimmung der Orientierung aus Punktwolken, die auch schon eingängig von vielen Autoren vorgestellt wurden. Der in dieser Arbeit neu aufgezeigte Prozess zur Auswertung beruht auf veränderten Vorgängen und nimmt zusätzlich mehr Bezug auf die Ermittlung von einzelnen Scharen innerhalb der Daten als auf die bloße Identifizierung von Orientierungen. Da das Ziel die Erstellung eines DFN Modells ist, wird der genauen Bestimmung einzelner Scharen eine besondere Bedeutung beigemessen. Eindeutig wird gezeigt, wie stark abhängig erreichbare Ergebnisse von den einstellbaren, kontrollierenden Parametern der Algorithmen zur Identifizierung von Normalenvektoren sind. In Kapitel 6.4.5 wird die hohe Bedeutung der eindeutigen Unterscheidung in einzelne Trennflächenscharen nochmals verdeutlicht. Die reine mathematische Identifizierung ist nicht ausreichend, da zu viele Bereiche erfasst werden, die nicht als Trennfläche markiert werden können. Eine oft praktizierte Vorgehensweise alle Orientierungen einer Punktwolke als Ausgangsdatensatz zu nutzen, ist nicht nachzuvollziehen. Es bedarf einer Interpretation der Ergebnisse und einer genauen Festlegung, welche identifizierten Orientierungen einer Trennflächenschar angehören und später in weiteren Modellierungen genutzt werden sollen. Dieses Vorgehen ist nicht nur in Bezug auf die Erstellung von DFN Modellen wichtig, sondern auch bei anderen Fragestellungen, die die Orientierung eines Aufschlusses miteinbezieht.

### 7.1.2 Größe

Die wirkliche Bestimmung der Größe einer Trennfläche aus Laserscandaten erweist sich als überaus problematisch. Erfolgreich werden Methoden vorgestellt, mit denen sich die sichtbare Kluftflächengröße und deren Länge und Höhe automatisch quantifizieren lassen. Die als Methode 2 vorgestellte Herangehensweise wird favorisiert und beruht auf der Auswertung von Kluftflächen mithilfe der Software Fracman. Auch wenn sich so die Kluftspurlängen ermitteln lassen und die statistischen Parameter bestimmt werden, verbleibt die reale Form der Klüfte innerhalb der Gesteinsinformation unbekannt und kann nicht festgestellt werden. Kapitel 5.2 zeigt aber bestmögliche Annäherungen an verschiedene, angenommene Ausgangsformen, seien es Ellipsen, Kreise oder Rechtecke. Diese Methode ist stark abhängig vom Flächenidentifizierungsalgorithmus und reagiert sehr sensibel auf unvollständig erkannte Oberflächen.

### 7.1.3 Intensität

Auf den ersten Blick erscheint die Bestimmung der Intensität einer Klüftung oder anderer Trennflächenscharen sehr simpel. Die Auswertung der Abstände zueinander kann im Rahmen der Genauigkeit der Flächenidentifizierung zügig erfolgen und liefert plausible Ergebnisse. Die Methode verlangt jedoch eine hohe Anzahl an erstellten Scanlines, um die statistische Signifikanz der Ergebnisse zu gewährleisten. Es ist deutlich erkennbar, dass Intensitäten in Bereichen hoher Punktdichte der Ausgangswolke ebenfalls höher sind als in Bereichen, die nur mäßig vom Laserscanner erfasst sind. Dort kommt es zu Löchern im Modell und eigentliche Trennflächen fehlen in der Auswertung durch die Scanline. Dieser Sachverhalt verzerrt erheblich die Ergebnisse und senkt die resultierende Intensität. Daher darf die Auswertung nur dort erfolgen, wo eine hohe Punktdichte gegeben ist und die tatsächlich vorkommenden Trennflächen als Fläche im Modell erkannt und repräsentiert werden. Eine Überprüfung kann hier nur vom Bearbeiter visuell vorgenommen werden. Trotz der Widrigkeiten ist die Erfassung der Intensität auf ein hohes Maß automatisiert und Ergebnisse werden durch Angabe von End- und Anfangspunkt einer Scanline schnell erreicht.

Problematisch bleibt die Umrechnung der Intensitäten. Durch die Scanline wird ein  $P_{10}$  Wert erhalten, der in einen  $P_{32}$  Wert umgerechnet werden muss, damit dieser in ein DFN Modell übertragen werden kann. Die Umrechnung erfolgt anhand einer mathematischen Annäherung mithilfe von Testreihen (siehe Kapitel 5.3.2), denn eine direkte Bestimmung von  $P_{32}$  ist unmöglich. Wie genau ein  $P_{32}$  Wert

dem ursprünglichen  $P_{10}$  Wert entspricht, kann über eine Beprobung des fertigen DFN Modells durch das Einfügen einer virtuellen Bohrung festgestellt werden (6.4.4).

### 7.2 Verzerrung bei der Aufnahme von Trennflächenparametern

Das finale Ziel der Untersuchungen an einem Aufschlussanalog ist die Beschreibung des Trennflächennetzwerks eines Gesteinskörpers. Die Darstellung der realen Trennflächenscharen ist kein kontinuierlicher Prozess. Die Resultate der Feldmessungen können durch verschiedene Einflussfaktoren verzerrt sein, die in den Methoden der Felduntersuchungen oder der Natur des Aufschlusses begründet sind. Die Scanline-Methode beispielsweise unterschätzt die Intensität der Klüftung, wenn die Orientierung der Scanline parallel zur Kluftorientierung liegt. Diese Ergebnisse müssen in einem weiteren Bearbeitungsschritt unter Anwendung verschiedener Annahmen und mathematischer Berechnungen korrigiert werden.

Traditionelle Geländemethoden fokussieren sich auf erreichbare Lokationen und da sie zudem sehr zeitintensiv sind, bilden sie nicht zwangsläufig alle Bereiche des Aufschlusses ausreichend ab. Das ist eine erste fundamentale Ergebnisverzerrung aufgrund einer unzureichenden Anzahl an Messungen und Daten. Die Anwendung eines Laserscanners erweitert die Datenbasis bei der Trennflächenanalyse und repräsentiert - soweit möglich - den gesamten Aufschlussbereich.

Die Übertragung traditioneller Feldmessungen als automatisierter Prozess bei der Analyse innerhalb von Punktwolken involviert die gleichen Verzerrungen und verlangt Korrekturmethoden. Weitere Verzerrungen werden aufgrund des Laserscanners selbst hinzugefügt, insbesondere eine Limitierung im Bereich der Auflösung der Punktwolken und Okklusion („occlusion“). Die folgende Auflistung zeigt eine Übersicht allgemeiner Verzerrungen, die den Arbeitsprozess bei der Trennflächenaufnahme mit terrestrischem Laserscanner beeinflussen.

Die erste Aufzählung zeigt allgemeine Verzerrungen bei der Trennflächenaufnahme:

- **Zensur:** Teile der Trennflächenoberfläche sind erodiert oder innerhalb des Gesteinsmassivs verdeckt. Ähnliche Trennflächen, die sich in unterschiedlichen Zeitepochen generiert haben, können einander durchschneiden und die originale Größe überprägen. Erodierte und verborgene Trennflächen verringern die Maximalwerte ermittelter Dichtefunktionen innerhalb jeder Größenklasse. Sich durchschneidende Trennflächen bilden Terminationskriterien ab, die unerlässlich sind für ein verbundenes Trennflächennetzwerk innerhalb des Gesteins.
- **F-Verzerrung:** Werden Trennflächen als kreisrunde Scheiben angesehen, so spiegelt die sichtbare Trennflächenspur im Aufschluss nicht zwangsläufig den Durchmesser dieser Scheiben wider, sondern zufällige Anschnitte/Sekanten (Priest 2004). Überträgt man diese Verzerrung von Spuren auf Oberflächen und elliptische Formen, so stellt die aufgeschlossene Fläche jede mögliche, zufällige Form der Ellipse dar (Sturzenegger und Stead 2009b). Daher markiert die berechnete Größen- bzw. Längenverteilung der Trennflächen im Aufschluss immer das untere Ende der realen Häufigkeitsverteilung.
- **Längen-/Größenverzerrung:** Große Trennflächen werden mit höherer Wahrscheinlichkeit geologisch aufgeschlossen als kleine (Zhang und Einstein 1998, Priest und Hudson 1981). Ergebnisse unterschätzen somit die Anzahl kleinmaßstäblicher Trennflächen.
- **Orientierungsverzerrung:** In Abhängigkeit von der Orientierung einer Trennflächenschar zur Orientierung der Aufschlusswand tendieren einige Scharen gerade dann zu einer Unterrepräsentation, wenn die Orientierung der Schar nahezu parallel zur Aufschlusswand liegt. Für die Bestimmung der Intensitätswerte durch die Scanline-Methode wird diese Verzerrung nach Terzaghi (Terzaghi 1965) korrigiert. Die relative Orientierung beeinflusst auch die Größenverteilung der Trennflächen und die Verzerrung kann durch die Untersuchung unterschiedlich orientierter Aufschlusswände gesenkt werden. Die Wahrscheinlichkeit jeder Trennfläche aufgeschlossen zu sein wächst mit der Anzahl unterschiedlich orientierter Aufschlussbereiche. Die in dieser Arbeit vorgestellte Methode zur Berechnung der Intensität beruht auf der Scanline-Methode, daher wird die Korrektur nach Terzaghi auf alle Resultate angewendet.

Die nachfolgende Aufzählung beinhaltet explizit Verzerrungen, die sich direkt aus der Anwendung eines terrestrischen Laserscanners ergeben:



**Trunkations-/Maßstabs-Verzerrung:** Trennflächen unterhalb eines Grenzwertes sind nicht sichtbar oder messbar. In Punktwolken liegt diese Trunkation in der ursprünglichen Auflösung der Punktwolke begründet (Sturzenegger und Stead 2009) und der Wahl der Kontrollparameter während des Prozessierens. Trunkation beeinflusst die Orientierungs-, Intensitäts-, Rauigkeits- und Größenanalysen. Die Größe der Dreiecke und die zugehörige minimale Anzahl an Dreiecken, um eine Fläche in SplitFX oder die Kontrollparameter bei der Flächendetektion durch einen RANSAC-Algorithmus zu erstellen, führt dazu, dass es einen unteren Grenzwert bei der Größenbestimmung gibt. Flächen unterhalb der minimal möglichen Fläche, die sich aus den Kontrollparametern ergeben, werden nicht erkannt und fließen somit nicht in die Ergebnisse ein. Die Größe der Dreiecke sowie die Funktionalität weiterer Kontrollparameter beruht immer auf der ursprünglichen Auflösung der Punktwolke. Abhängig von dieser Flächenerkennung sind sowohl die Größen- als auch die Intensitätsberechnungen. Ebenso ist die Erfassung von Orientierungen über die Normalvektoren durch die Auflösung beeinflusst. Bei der Berechnung der Vektoren aus RiSCAN Pro hängt die Anzahl der Punkte innerhalb eines Suchwürfels von der Auflösung ab. Die beiden Kontrollparameter der Suchwürfelgröße und der minimalen Anzahl an Punkten limitieren die kleinstmögliche Größe der Orientierungsanalyse. Die Detektion der Rauigkeit auf einer Fläche ist ebenfalls durch das TLS und dessen Auflösung nach unten hin begrenzt. Höhere Auflösungen führen immer zu detaillierteren Rauigkeitsergebnissen, sind aber auch ultimativ durch die Technik des Geräts begrenzt. Mit zunehmender Auflösung steigt auch das Rauschen in der Aufnahme und macht die Ergebnisse unbrauchbar.

**Sichtfeld- und Distanzverzerrung:** Beide Verzerrungstypen sind von Lato et al. 2010 eingeführt und beziehen sich auf den Fall einer Einzelmessung durch TLS, das heißt die Aufnahme von nur einer Scanposition aus. Die Auflösung der Punktwolke hängt von der Distanz zwischen Scanobjekt und Laserscanner ab und der relative Einfallswinkel von der Sichtlinie des Scanners und der Oberfläche. Ein Wichtungsfaktor, der beide Probleme berücksichtigt, hilft die resultierenden Ergebnisse und Stereogrammdarstellung zu korrigieren. Viele Aufschlüsse sind derart gestaltet, dass eine ebene Fläche vor steilen, vertikalen Wänden liegt. Von dieser Ebene aus, beispielsweise dem Bodenbereich im Steinbruch, werden mehrere Laserscans durchgeführt. Die Positionen des Scanners verschieben sich seitlich in horizontaler Position (x- und y-Richtung), aber nur unwesentlich in der vertikalen (z-) Richtung. Multiple Scanvorgänge beugen einer Korrektur der Distanz und des horizontalen Einfallswinkel des Laserstrahls vor. Die Lokationen bzw. Scanpositionen werden so gewählt, dass die Okklusion entlang der Horizontalen vermieden wird und die resultierende Punktwolke eine möglichst einheitliche Punktdichte aufweist. Ein Octree-Filterprozess hilft nach Zusammenstellung der kompletten Punktwolke bei der Homogenisierung der Punktdichte. Nichtsdestotrotz ist eine Korrektur des vertikalen Einfallswinkels notwendig, wenn die Scanpositionen nur lateral in einer Ebene variieren. Eine vertikale Oberfläche, die in Blickrichtung und auf Höhe des Scanners liegt, wird wenig oder gar nicht vom Laser erfasst. Mehrfache Scanpositionen erhöhen kaum die Punktdichte bei so flachen Einfallswinkeln. Scanpositionen sollten so gewählt werden, dass sie auch in der Vertikalen variieren, was jedoch meist aufgrund der örtlichen Gegebenheiten nicht möglich ist. Da einer der Kontrollparameter bei der Orientierungs- und Flächendetektion die minimale Anzahl an Punkten in der Fläche ist, werden Flächen niedriger Punktdichte seltener erfasst. Diese bleiben verborgen.

**Okklusionsverzerrung:** Slob (Slob 2010) bezieht sich auf eine horizontale und vertikale Verzerrung durch Okklusion. Ist eine Gesteinsoberfläche außerhalb der Sichtlinie des Scanners, ist diese nicht zu detektieren und fließt nicht in die Ergebnisse ein. Vertikale und horizontale Okklusion durch Oberflächen parallel zur Sichtlinie des Scanners oder außerhalb dessen Sichtfeld werden durch mehrere Scanpositionen in unterschiedlicher Höhe und variierende laterale Positionen erreicht.

### 7.3 Verzerrung in den Ergebnissen dieser Arbeit

Die vorgestellten Resultate dieser Arbeit unterliegen auch den hier vorgestellten Verzerrungen. Die Okklusionsverzerrung ist einer der am häufigsten auftretenden Verzerrungen und lässt sich nahezu nicht umgehen. Das Abtasten einer kompletten unebenen Oberfläche wird nur über eine sehr große

Anzahl an Scans und durch sehr variable Positionen erreicht. Besonders Positionen unterschiedlicher Höhe spielen dabei eine gewichtige Rolle.

Wir unterscheiden zwei Typen der Okklusionsverzerrung. Erstens die horizontale Okklusion, die nahezu der Sichtfeldverzerrung gleicht, zweitens eine generelle Okklusion durch Schattenbereiche, jene Flächen also, die überhaupt nicht vom Scanner erfasst werden.

Gerade horizontale Trennflächen, wie in unseren Beispielen die Schichtung, sind von der horizontalen Okklusion stark betroffen. So ist diese in manchen Bereichen nicht in den Ergebnissen vorhanden. Oft ist auch das Relief zu schwach ausgeprägt, die Schichtung bildet nur selten sichtbare Flächen aus.

### 7.4 Durch TLS identifizierbare Trennflächenparameter

In dieser Arbeit werden Arbeitsabläufe gezeigt, um verschiedene Trennflächenparameter mithilfe von terrestrischen Laserscanning zu quantifizieren. Die Tabelle 7.1 gibt eine Übersicht über diese Parameter. Dort ist ebenso verzeichnet, welche der Parameter wichtig für die Integration in ein DFN Modell sind, unabhängig davon, ob diese für hydraulische, geomechanische oder Stabilitäts-Analysen genutzt werden.

Zwar werden die Arbeitsabläufe so weit wie möglich automatisiert, jedoch bedürfen die Arbeitsschritte oft manueller Eingaben, sei es beispielsweise bei der Festlegung kontrollierender Parameter für die Flächenerkennungs-Algorithmen. So kann die Zugehörigkeit einer Trennfläche zu einer Schar die sich aus den Orientierungen bzw. der Raumlage ergeben, über Clusteranalysen festgelegt werden, die unterschiedliche Algorithmen folgen. Auch die Abstände zwischen Flächen können halb-automatisch ermittelt werden, und zeitgleich daraus die nötigen Intensitätsparameter mathematisch festgelegt werden. Die Matrixblockgröße ergibt sich aus der Kombination der Raumlage und der Abstände und kann mathematisch berechnet oder über das DFN Modell analysiert werden. Ebenso kann die Rauigkeit von Flächen in Abhängigkeit von der Auflösung des Gerätes bestimmt werden.

Terminationskriterien können noch nicht automatisch über das Laserscanning erfasst und ausgewertet werden. Jedoch obliegt dem Bearbeiter der Punktwolke die händische Interpretation der Terminationen unterschiedlicher Scharen in der Punktwolke selbst. Die Integration der RGB Informationen erleichtert diese Arbeit erheblich.

Um welchen Typ Trennfläche es sich handelt, kann begrenzt über die Punktwolke bestimmt werden. Hierbei spielen die Erfahrung des Bearbeiters und die RGB Informationen eine wichtige Rolle. Die Unterscheidung in Typen kann meist nur nach einer Begehung des Aufschlusses getroffen werden, oder wenn die vorkommenden Typen bereits bekannt sind. Gelegentlich ist eine Identifizierung von Schichtflächen, da sich diese meist über große Bereiche erstrecken, oder von Störungen, wenn Harnische erkennbar sind, möglich. Genaue und 100%-sichere Angaben sind nicht möglich.

Ausgenommen von der Apertur und der Geometrie der Trennflächen können alle notwendigen Parameter aus der Punktwolke gewonnen werden. Die Geometrie von Trennflächen ist nur über theoretische Annahmen abzuschätzen und kann durch Feldmessungen nicht bestimmt werden. Für die Erstellung von DFN Modellen sind auch Angaben über die Permeabilität und Kompressibilität von beispielsweise Klüften notwendig (siehe Kapitel 6.4.3). Diese sind nicht über Feldmessungen bestimmbar, sondern ergeben sich rechnerisch aus der Apertur bzw. der Veränderung unter Druckeinfluss und den Eigenschaften der durchströmenden Fluide. Diese werden nicht direkt als Trennflächenparameter definiert und müssen zusätzlich für ein DFN Modell ermittelt werden.

### 7.5 Fehlende Trennflächenparameter

Die Identifizierung einer Vielzahl von Trennflächenparameter ist durch das terrestrische Laserscanning gegeben. Unsere Methoden erlauben die Quantifizierung der Orientierung, der Intensität und Größe von Trennflächen. Für die Erstellung eines DFN Modells zur hydraulischen Aufskalierung sind jedoch 6 Parameter nötig. Hinzu kommen die Apertur, Kompressibilität und Permeabilität. Für geomechanische Betrachtungen sind zudem die Normal- und Schersteifigkeit der Trennflächen anzugeben. Für Stabilitätsanalysen ist zudem noch der JRC relevant, der dank des

Laserscannings aus der Punktwolke analysiert werden kann. Beschränkt wird diese Analyse allerdings durch die Auflösung des Geräts.

Das terrestrische Laserscanning erzeugt Punktwolken beliebiger Objekte. Diese Punktdaten sind diskontinuierlich. Der minimale Punktabstand ist abhängig von den Spezifikationen des eingesetzten Gerätes und der Distanz zum Objekt. Die Auflösung des eingesetzten Riegl VZ400 ist beschränkt auf den Millimeter- und Zentimeterbereich. Ebenso beeinflusst die Dicke des Laserstrahls selbst die Genauigkeit der Ergebnisse.

Typische Aperturen von Trennflächen liegen unterhalb dieser Auflösung und bedürfen kontinuierlicher Daten. Weiterhin bleibt der Übertrag von Aperturen aus Oberflächenaufschlüssen in ein Reservoirmodell ambitioniert, da sie nicht den Aperturen auf Reservoirniveau entsprechen.

Zementierte Trennflächen können nicht aus der Punktwolke extrahiert und analysiert werden. Zwar geben die Reflektionswerte, sofern die Füllung durch den Laserstrahl getroffen wird, Informationen über die Lithologie, wodurch eine qualitative Unterscheidung zum umliegenden Gestein möglich ist, aber keine genaue Aussage über die mineralogische Zusammensetzung. Die Auflösung begrenzt die Identifizierung von Adern/Zementierungen im Millimeterbereich.

**Tabelle 7.1 Übersicht über die Trennflächenparameter, deren Notwendigkeit bei der Erstellung eines DFN Modells und eine Angabe darüber, ob diese Parameter über unsere Methode der Trennflächenparameterbestimmung aus TLS Daten bestimmt werden können. Dabei werden die Methoden nach halb-automatisch und nötiger manueller Interpretation in der Punktwolke unterschieden. Zusätzlich sind einige Parameter einzig über Feldmessungen zu bestimmen.**

Parameter	Notwendig für DFN Modell	TLS
Typ	✓	manuelle Interpr.
Schar	☒	halb-autom.
Raumlage	✓	halb-autom.
Abstand	✓	halb-autom.
Persistenz	✓	halb-autom.
Geometrie	✓	Theoretische Annahmen
Intensität	✓	halb-autom.
Matrixblockgröße	☒	halb-autom.
Apertur	✓	Feldmessungen
Rauigkeit	✓	halb-autom.
Zementierung	☒	Feldmessungen
Kluftwandstärke	☒	Feldmessungen
Durchflussrate	☒	Feldmessungen
Termination	✓	manuelle Interpr.

## 7.6 Zusammenfassende Diskussion der DFN Modelle

Verschiedene Aspekte der DFN Modellierung und Anwendungen von DFN Modellen werden in dieser Arbeit erläutert. Gemein ist allen Anwendungen, dass sie auf einem Modell beruhen, das aus TLS Daten generiert wird. Der Anteil der TLS Daten beschränkt sich innerhalb des DFN Modells jedoch auf rein geometrische Aspekte, genauer der Orientierung und Größe von Flächen sowie deren Anzahl (Intensität). Parameter wie die Apertur oder Kompressibilität können nicht aus Punktwolken bestimmt werden. Im Bereich der geometrischen Eingabedaten liefert das TLS aber einen enormen Fortschritt und erweitert die Datenbasis bei der Untersuchung von Aufschlüssen in einem Maße, das durch eine manuelle Geländeaufnahme nur unter einem erheblichen Zeitaufwand erreicht werden würde. Der Import der Datensätze in ein DFN Modell, sei es als deterministischer oder stochastischer Anteil, erfolgt absolut problemlos und direkt. Vorgestellt werden verschiedene Anwendungsbereiche eines DFN Modells. Diese unterteilen sich in die Bestimmung hydraulischer und geomechanischer

Eigenschaften eines Kluftnetzwerks, in Stabilitätsanalysen geklüfteter Gesteinskörper und die Ermittlung von Gesteinsblockgrößen. Für alle 4 werden Vor- und Nachteile bereits in den Kapiteln 6.6.3-6.6.8 eruiert. Der Einfluss geometrischer Eingabeparameter auf die berechenbaren Parameter wird genau überprüft. Es wird festgestellt, dass die hydraulische Permeabilität hauptsächlich von der Intensität der Klüftung abhängt, respektive ihrem  $P_{32}$  bzw.  $P_{33}$  Wert. Es bestätigt sich somit der in Abbildung 6.2 dargestellte Zusammenhang von Kluftabstand, Permeabilität und Apertur. Die etwas schnellere Oda Methode zur Berechnung hydraulischer Parameter ist oft ausreichend, gerade dann, wenn eine hohe Konnektivität innerhalb des Kluftnetzwerks herrscht. Bei Modellen mit hoher Intensität der integrierten Trennflächenscharen spielt die Größe und Form der Flächen nur eine untergeordnete Rolle. Die Intensität bestimmt die Höhe der Permeabilität, während die Orientierung die bevorzugten Richtungen des Fluidflusses angibt. Ein ähnlicher Trend zeigt sich bei geomechanischen Aufskalierungen des E-Moduls. Auch hier ist die Intensität der Haupteinflussfaktor. Schwierig ist allein die Bestimmung der Normal- und Schersteifigkeit von Klüften, die als Eingabeparameter des DFN Modells unerlässlich sind.

Die auf einem DFN Modell durchgeführten Stabilitätsanalysen bergen eine schöne Alternative zu herkömmlichen Berechnungen. Sie nehmen stärker Bezug auf die Verschneidung und Intensität unterschiedlich orientierter Trennflächen, sind jedoch sehr rechenintensiv und können nur schwer auf sehr große Aufschlussbereiche ausgedehnt werden, hier bietet sich eine Simplifizierung der Gegebenheiten durch Vernachlässigen kleiner Trennflächen oder Detailreduzierung der Böschungsoberfläche an. Mithilfe der Blockgrößenbestimmung ist nun auch einfach die Bestimmung der Form der sich bildenden Blöcke aus einer Vielzahl von Trennflächen möglich. Eine einfache Bestimmung über MDS (*multi-dimensional spacing*) sollte jedoch nicht genutzt und stattdessen nur die Fragmentierungsmethode angewendet werden. Nach ihrer Erstellung sind DFN Modelle mächtige Werkzeuge bei der Untersuchung geklüfteter Gesteinskörper. Ihre Genauigkeit und Vorhersagekraft beruht einzig auf den Eingabedaten, deren statistische Signifikanz bei der Untersuchung von Oberflächenaufschlüssen oder Minen durch das terrestrische Laserscanning immens angehoben wird.

## 8 Perspektiven der TLS-Anwendung

Neben der reinen Bestimmung von Trennflächenparametern gibt es auch weitere Einsatzmöglichkeiten eines terrestrischen Laserscanners. Viele der nachfolgend dargestellten Methoden bedürfen aber noch weiterer Erprobung und Entwicklung. Sie wurden im Rahmen der Promotion am Rande mitbehandelt, sind aber nicht Hauptthema dieser Arbeit.

### 8.1 Volumenbestimmung

Basierend auf den durch Laserscanning gewonnen Punktwolken können über geometrische Annahmen Volumina berechnet werden. Dazu existieren eine Reihe von anwenderfreundlichen Programmen und Arbeitsabläufen:

- Durch eine Punktwolke können Profillinien gezogen werden. Entlang einer aufgeschlossenen Felswand wird eine Ausgleichsfläche gelegt. Es wird eine Fläche an die Stelle gesetzt, bis zu der abgebaut werden soll bzw. bis an die von der Sprengung zu erreichende Stelle. Hierbei wird die Differenz des Volumens von Fläche bis Punktwolke bestimmt.
- Im Rahmen des voranschreitenden Abbaus in einem Tagebau bzw. Steinbruch kann das abgebaute Volumen bestimmt werden. Zum einen kann eine
  - a) erste Schätzung vor der Sprengung bzw. des Abbaus auf Grundlage der Laserscandaten erfolgen. Diese grobe Abschätzung eignet sich allgemein für jede Art der Volumenbestimmung an einer Felswand.
  - b) Zum anderen ist über wiederholte Scanvorgänge vor und nach dem Abbau an der Felswand eine Bestimmung des Volumens möglich. Für diesen zweiten Ansatz stehen unterschiedliche Verfahren zur Verfügung. Auch hier ist eine erste grobe Abschätzung des abgebauten Volumens möglich.
- Neben der vereinfachten Darstellung von Profillinie und Ausgleichsfläche sind in der Software RiSCAN Pro, aber auch in CloudCompare, Möglichkeiten enthalten, um direkt zwei

Punktwolken im Hinblick auf ihre Abstände miteinander zu vergleichen. Nach einer Sprengung oder einem Abbau einer Wand aufgenommene Punktwolken können so mit dem vorigen Zustand verglichen werden. Die Abstände der Punktwolken zueinander werden durch die Programme berechnet und farblich auf der Punktwolke dargestellt, um Bereiche des Verlustes und des Zuwachses an Material darzustellen. Neben der Quantifizierung einzelner Abstände kann in RiSCAN Pro auch ein kompletter Volumenkörper zwischen den Oberflächen erzeugt werden, der eine Abschätzung des abgesprengten oder abgebauten Volumens zulässt.

## 8.2 Lithologiebestimmung

Neben der reinen Lokation von Messpunkten durch kartesische Koordinaten kann ein Laserscanner auch die Intensität des Lasersignals registrieren, das auf einer Oberfläche reflektiert wird. Die Intensität des reflektierten Signals hängt von der Distanz zum Objekt, den Reflektionseigenschaften des Oberflächenmaterials und atmosphärischen Parametern ab. Letztere können für das TLS mit Distanzen unter 1 km vernachlässigt werden. Da die Intensität die Reflektionseigenschaften eines Materials widerspiegelt, liegt die Idee nahe, die Intensitäten mit unterschiedlichen Lithologien zu korrelieren. In der Praxis gibt es nun unterschiedliche Ansätze, nämlich die Anwendung eines einzelnen Scanners eines Wellenlängenbereichs zur Intensitätsbestimmung, der Einsatz multipler Scanner unterschiedlichen Wellenlängenbereichs oder eine Kombination von Laserscanner und hyperspektraler Analyse (Kurz 2008, 2012; Hartzell 2014). Der Einsatz multipler Scanner ermöglicht die Analyse von Materialien für verschiedene Spektren, jedoch verfügen viele terrestrische Laserscanner über einen ähnlichen Wellenlängenbereich im nahen Infrarot.

Der von uns eingesetzte Riegl VZ400 Laserscanner deckt nur einen Wellenlängenbereich von 1550 nm ab und liegt ebenfalls im nahen Infrarot. Intensitäten werden als Amplituden gekennzeichnet und die Amplitudenabschwächung zwischen dem ausgehenden und wieder eintreffenden Signal bestimmt. Intern berechnet das Gerät einen Reflektionswert, der die um den Distanzeffekt korrigierte Amplitude darstellt.

Im Rahmen verschiedener Untersuchungen an Bohrkernen, Gesteinsproben und Aufschlussmessungen wird ersichtlich, dass eine qualitative Unterscheidung zwischen Gesteinsarten und auch zwischen Mineralen möglich ist. Das Signal hängt stark vom Eintreffwinkel auf die Oberfläche, von der Feuchtigkeit auf der Fläche, der Distanz, der Farbe und der Rauigkeit des Materials ab. Dies erschwert die Auswertung und macht eine quantitative Aussage über die Lithologie nahezu unmöglich.

## 8.3 Rauigkeit

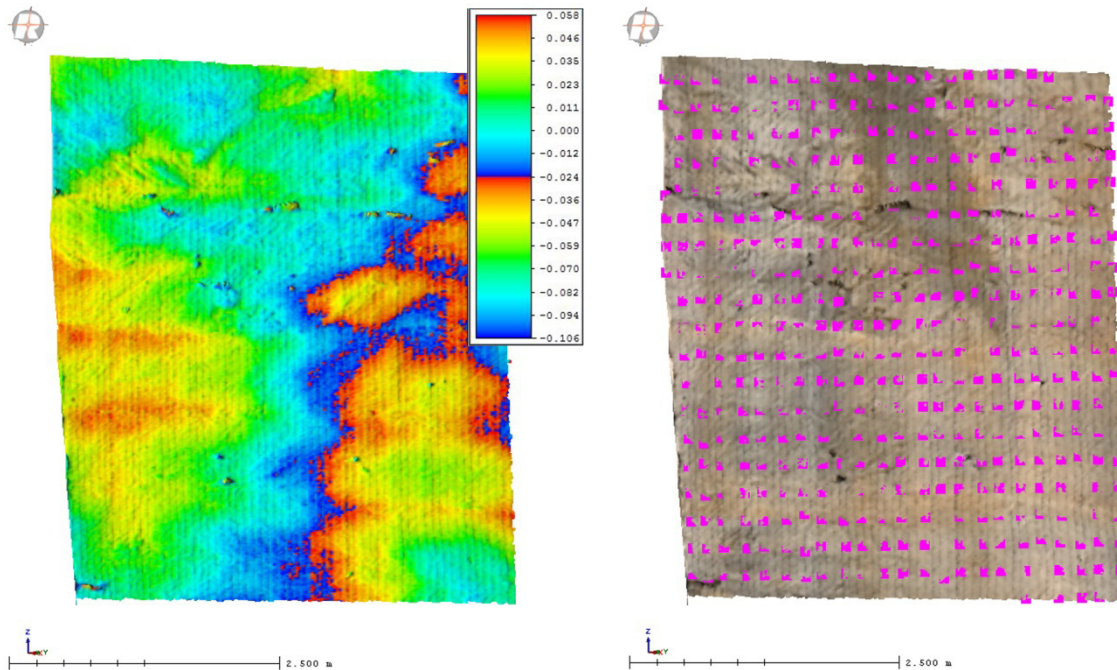
Die mithilfe des Laserscanners aufgenommene Gesteinsoberfläche kann auch weiteren Untersuchungen wie der Rauigkeits- oder Krümmungbestimmung unterzogen werden (Sturzenegger & Stead 2009). Nötig ist dabei aber ein Modell hoher Punktdichte, da die Bestimmung der Rauigkeit maßstabsabhängig und die Rauigkeit proportional zur Auflösung des Laserscans ist. Die Genauigkeit von Laserscannern ist im Millimeterbereich begrenzt und Punktwolken tendieren dazu, ein signifikantes Punktrauschen aufzuweisen. In kleinen Maßstabsbereichen ist die Unterscheidung zwischen wahrer Rauigkeit und Punktrauschen eine große Herausforderung, im Bereich grober Maßstäbe ist die Bestimmung der Rauigkeit aus Punktwolken eine gute Alternative zur händischen Aufnahme (Fekete et al. 2010).

Die Rauigkeit kann durch den Vergleich einer Referenzfläche mit der eigentlichen Gesteins- bzw. Trennflächenoberfläche visualisiert werden (Fekete et al. 2010, Sturzenegger & Stead 2009). Die Referenzfläche ist eine planare Ausgleichsfläche durch die Punkte der ausgewählten Trennfläche, die manuell vom Benutzer in das Modell eingefügt werden kann. Die orthogonalen Abstände (Residuen) zwischen der Fläche und allen Punkten werden bestimmt. Dieser Abstand  $r_r$  wird durch den Einsatz einer Hilfslinie  $h_r$  orthogonal zur Ausgleichsfläche  $E_r$  (über einen zufälligen Punkt  $F_r$  auf dieser Fläche und einen Schnittpunkt  $L_r$  von  $E_r$  und  $h_r$ ), die durch den Vergleichspunkt  $P_r$  der Trennflächenoberfläche läuft, bestimmt. Dabei gilt:

$$E_r: \vec{n}[\vec{x}_r - \vec{F}_r] \cap h_r: \vec{x}_r = \vec{P}_r + \ddot{e}_p \vec{n} \quad 8.1$$

$$r_r = \|\vec{L}_r - \vec{P}_r\|_2 = \|\ddot{e}_p - \vec{n}\|_2 \quad r, \ddot{e} \in R \text{ \& } x, n, F, P, L \in R^3 \quad 8.2$$

Die Punkte werden entsprechend ihres Abstands in ein Farbschema überführt. Diese Art der Visualisierung ist zur Detektion von Bereichen hoher und niedriger Rauigkeit sowie der Krümmung geeignet.



**Abbildung 8.1** Visualisierung der Rauigkeit durch farbige Darstellung der Residuen (links) auf einer ausgewählten Trennfläche.

Gemäß Sturzenegger & Stead (2009) kann die Kompass und Disk-Klinometer Methode auf Punktwolkenmodelle übertragen werden. Diese Methode sieht die Orientierungsmessung innerhalb eines gewählten Beprobungsrahmens ansteigender Größe vor. Man erlangt dadurch einen dreidimensionalen Rauigkeitswinkel. Ursprünglich basiert die Methode auf mehrfachen Orientierungsmessungen auf einer Fläche unter Nutzung von runden Platten unterschiedlichen Durchmessers (5, 10, 20 und 40 cm) (Fecker & Rengers 1971). Die Resultate der Messungen werden als Polpunkte in ein Stereogramm zur Bestimmung des Rauigkeitswinkels I für jede mögliche Bewegungsrichtung auf dieser Fläche (Abbildung 8.2) geplottet. Dieser Winkel erlaubt Rauigkeitsbestimmungen, falls die reale Bewegungsrichtung einer Rutschfläche unbekannt ist.

In dieser Arbeit wird nun ein Ablauf vorgestellt, der die Bestimmung des Winkels vereinfacht und teilweise automatisiert. Hierzu werden die gleichen Methoden wie bei der Orientierungsbestimmung genutzt (siehe Kapitel 5.1). Dazu muss der *plane patch filter* aus RiSCAN Pro verwendet werden. Zunächst wird eine zu untersuchende Trennfläche innerhalb der Punktwolke extrahiert. Das Ziel ist sowohl die Unterteilung dieser Oberfläche in kleine Bereiche als auch die Orientierung jeder dieser Bereiche zu bestimmen. Dieser Vorgang erfolgt analog zur Auswertung der Normalvektoren bei der Orientierungsanalyse. Der Filter unterteilt die Punktwolke durch überlagerte Würfel konstanter Größe und quantifiziert die Orientierung der Fläche innerhalb des Würfels (Abbildung 8.3). Vier unterschiedliche Würfelgrößen werden analog zur unterschiedlichen Plattengröße bei der Originalmethode im Gelände genutzt. In diesem Beispiel werden Würfelgrößen von 6,4, 12,8, 25,6 und 51,2 cm ausgewählt. Die weiteren Kontrollparameter müssen dabei konstant bleiben. Die Resultate werden innerhalb eines Stereogramms als Polpunkte visualisiert. In dem hier dargestellten



Beispiel sinkt der Rauigkeitswinkel  $I$  bei ansteigender Würfelgröße (Abbildung 8.2). Für eine Würfelgröße von 51,2 cm beträgt der negative Winkel  $-I$   $19^\circ$  und der positive Winkel  $I$   $13^\circ$ . Bei einer kleinen Würfelgröße von 6,4 cm beträgt der Winkel hingegen  $31^\circ$  bzw.  $28^\circ$ .

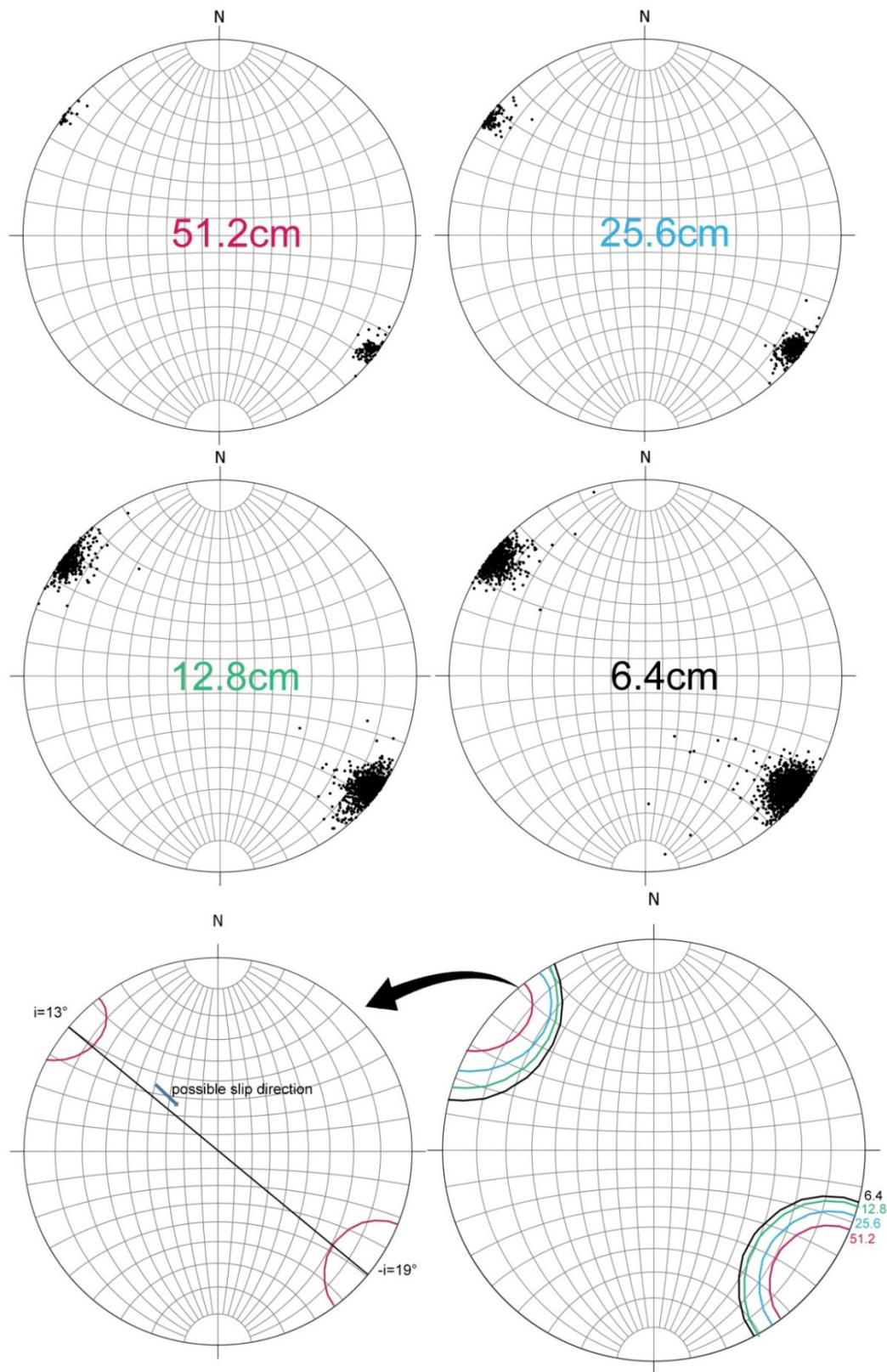


Abbildung 8.2 Die Ergebnisse der Orientierungsanalyse auf Flächen unterschiedlicher Größen werden als Polpunkte dargestellt. Ein umschließender Kreis um alle Polpunkte markiert die Ausdehnung des Rauigkeitswinkels  $I$ . Dieser kann direkt am Kreis über die Eintragung einer möglichen Rutschungsbewegung (possible slip direction) abgelesen werden.

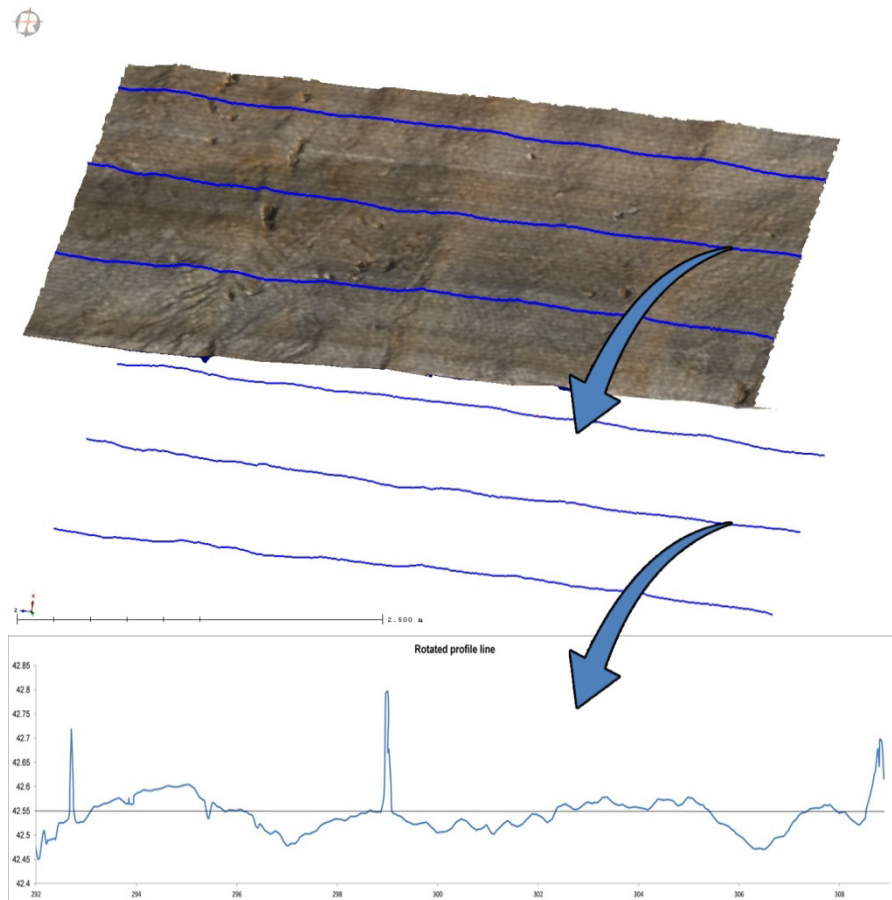
Ein anderer Standardansatz zur Quantifizierung von Rauigkeiten ist die Bestimmung der richtungsbezogenen Rauigkeit, die durch die Anwendung einer zweidimensionalen Methode auf der Punktwolke bestimmt werden kann. Profillinien durch die triangulierte Oberfläche einer Trennfläche bilden die Basis der Rauigkeitsquantifizierung durch beispielsweise den *joint roughness coefficient* (JRC) (Barton & Choubey 1977, Haneberg 2007) (Abbildung 8.3). Parameter wie der JRC können zur Abschätzung der Scherfestigkeit von Trennflächen genutzt werden (Barton & Choubey 1977). Nach Tse & Cruden (1979) wird der JRC approximiert über:

$$JRC = 32.2 + 32.47 \log Z_2 \quad Z \in R \quad 8.3$$

$Z_2$  ist ein Wert, der sich aus der Quadratwurzel der durchschnittlichen Residuen zwischen den Punkten und einer Horizontalen bestimmt:

$$Z_2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m-1} (z_i - z_{i+1})^2}{(m-1)\Delta s^2}} \quad Z, z, s \in R \text{ \& } i, m \in N \quad 8.4$$

Mit  $z_i$  als Residual an Ort  $I$ ,  $m$  die Gesamtanzahl an Punkten und  $\Delta s$  als die mittlere Distanz zwischen 2 Messpunkten. Die Profillinien, die als Polylines manuell in das Modell eingefügt werden (Abbildung 8.3), bestehen aus einer vordefinierten Anzahl an Punkten. Um die Residuen dieser Profillinie zu berechnen, muss die Linie über eine Rotationsmatrix horizontal ausgerichtet werden.



**Abbildung 8.3** Erstellte Profillinien (blau) und Diagrammdarstellung dieser Linie in der Horizontalen zur Berechnung der Residuen.

## 9 Fazit

Terrestrisches Laserscanning ist nicht nur eine effiziente Methode zur dreidimensionalen Darstellung und Konservierung von Oberflächenstrukturen wie Aufschlüssen, sondern eignet sich auch für geologische Untersuchungen. Aus einer terrestrischen Laserscankampagne erstellte Punktwolken werden zur automatischen und halbautomatischen Bestimmung von Trennflächenparametern wie der Orientierung, Intensität und Größe eingesetzt. Erfolgreich konnten hierzu verschiedene Methodiken entworfen werden. Der in dieser Arbeit vorgestellte Ablauf verkürzt die Bearbeitungszeit und garantiert eine hohe Datendichte. Der manuelle Einsatz eines Bearbeiters wird auf ein Minimum reduziert. Eine weitgehende Automatisierung der Vorgänge ist zwingend notwendig, da nur so mit den großen Datenmengen der Punktwolken umgegangen werden kann und im Endeffekt ein ebenso großer Ergebnisdatensatz vorliegt, der aufgrund seiner Größe eine hohe statistische Signifikanz aufweist. Umfassende Daten werden für Aufschlussbereiche erlangt, die für eine manuelle Messung nicht erreichbar sind. Das TLS stellt also eine unterstützende Methode bei geologischen Geländeaufnahmen dar und kann die Messung der Orientierung, Intensität und Größe komplett übernehmen. Allein zur visuellen Interpretation und Bestimmung der Lithologie/Mineralogie der Strukturen ist eine Begutachtung des Aufschlusses vor Ort durch einen Geologen nötig. Die mögliche Auswertung großer Aufschlussstrukturen bis in den Kilometerbereich erlaubt nun schneller eine Quantifizierung lokaler Veränderungen der Kluftparameter.

Ein wesentliches Merkmal der Auswertungen von Trennflächenparametern in Punktwolken als Ergebnis eines terrestrischen Laserscanningvorgangs ist die Überführung händischer Auswertemethoden auf eben diese Punktwolke. Die grundlegende Identifizierung von Flächen bildet das Fundament der Auswertung. Diese Flächen, bestehend aus zusammengefassten Punktdaten, symbolisieren die geologischen Trennflächen. Auf ihnen basiert unter anderem die Ermittlung von Normalenvektoren als Orientierungsmerkmal und die Quantifizierung der Größe über Eckpunkte der erstellten Flächen. Die Abstände der Flächen zueinander, bei denen das Wissen über Mittelpunkt und Größe der Flächen die wichtigste Rolle spielt, erlaubt die Berechnung von Intensitätswerten. Die Berechnungen aller Parameter beruhen auf mathematischen Grundlagen der Geometrie und linearen Algebra.

Erfolgreich werden Arbeitsabläufe entwickelt, die folgende Trennflächenparameter bestimmen:

- **Orientierungen** von Trennflächen sind aus der Punktwolke bestimmbar und deren Unterteilung über eine Clusteranalyse möglich. Eine Rückkopplung der Ergebnisse über eine Visualisierung von Orientierungen (beispielsweise farblich) in der Punktwolke erlaubt eine Validierung der Daten.
- **Intensitätswerte** ( $P_{10}$ ) können über manuell entwickelte Scanlines (Polylines) bestimmt werden. Die Intensität kann über eine Farbskalierung in der Punktwolke dargestellt werden. Eine Überführung von eindimensionalen  $P_{10}$  in räumliche  $P_{32}$  Werte ist mathematisch möglich.
- Die **Größe** und **Form** von Trennflächen kann über die in dieser Arbeit vorgestellten Arbeitsabläufe aus den Laserscandaten angenähert werden.
- Die **Rauigkeit** einzeln gewählter Flächen wird aus der Punktwolke heraus quantifiziert.

Die vorgestellten Methoden und Abläufe zielen auf die Erstellung von Discrete Fracture Network Modelle ab. Die Integration der aufgenommenen Daten in diese Modelle erweist sich als problemlos und schafft eine statistisch signifikante Basis, die sich positiv auf die Aussagekraft der Modelle auswirkt. DFN Modelle von Reservoiranalogon können genutzt werden, um Vorhersagen über das hydraulische Verhalten eines Reservoirs zu treffen und eventuelle laterale Variationen festzustellen. Das TLS ist eine allumfassende Methode, um die geometrischen Parameter, auf deren Grundlage die hydraulischen Berechnungen, beispielsweise die Permeabilität, erfolgen, zu erfassen. Im Gegensatz zu Bohrungsdaten zeigen die Parameter aus den TLS Datensätzen eindeutig lokale Variationen, aus denen allgemeingültige Trends abgeleitet werden können. Darüber hinaus werden Methoden des geomechanischen Aufskalierens, der Stabilitätsanalyse von Hängen und Tunneln sowie die Analyse von Blockgrößen vorgestellt. Alle 3 Anwendungen basieren direkt auf den TLS Datensätzen. Zusammenfassend können über die DFN Modelle folgende Parameter berechnet werden:

- Durch das Aufskalieren von Trennflächeneigenschaften können innerhalb eines Rasters die **Permeabilität** der Trennflächen im Raum sowie die aus Gesteinsmatrix und Trennflächen

zusammenwirkende Permeabilität bestimmt werden. Die Wahl des geeigneten Algorithmus obliegt dem Anwender in Abhängigkeit von Rechenleistung, Zeit und Detailgrad des Modells.

- Geomechanisch lassen sich der **E-Modul** und die **Poissonzahl**, die maßgeblich vom Durchtrennungsgrad des Gebirges beeinflusst werden, aufskalieren.
- Die **Stabilität** von Hängen und Tunneln wird über einen Sicherheitsfaktor beschrieben und statistisch wahrscheinliche, abrutschende oder fallende Gesteinsblöcke dargestellt.
- Aus dem Trennflächennetzwerk lässt sich die durchschnittliche **Größe von Gesteinsblöcken** sowie deren Form aus dem DFN Modell abschätzen.

Perspektivisch zeigt sich, dass zukünftig im Bereich der Lithologieerkennung ein großes Potential in terrestrischen Lasersystemen liegt. Eine Identifizierung und Unterscheidung verschiedener Gesteine würde automatisiert zur präzisen Beschreibung von Aufschlüssen führen und die Arbeit der Geowissenschaftler weiter vereinfachen und beschleunigen. Im Detail lassen sich folgende Perspektiven und Möglichkeiten auflisten:

- Die **Lithologieerkennung** spielt eine zentrale Rolle. Durch die Anwendung von multi- oder hyperspektralen Laserscanning Systemen ist eine präzisere Identifizierung unterschiedlicher Gesteine möglich. Denkbar ist auch eine Kopplung der Laserscanningdaten mit weiteren Daten, die einzelnen Punkten zugeordnet werden können. Hierbei stellt auch die Anwendung von Wärmebildkameras eine zusätzliche Option dar.
- Eine **Zusammenfassung** automatisierter Auswerteverfahren für Trennflächenparameter in einem **Softwarepaket** würde die Bearbeitungszeit drastisch senken und die Arbeitsschritte vereinfachen. Das Transferieren von Daten zwischen verschiedenen Softwarelösungen ist meist noch problematisch.

Die Anschaffung eines Terrestrische Laserscanning Systems rechtfertigt sich nur, wenn der Detailgrad der Ergebnisse gegenüber traditionellen Auswertemethoden erhöht, die Datenbasis signifikant vergrößert, dabei jedoch keine überflüssigen Daten erstellt werden, sowie die Zeit der Auswertung und der Aufnahme im Gelände unter unterschiedlichen Bedingungen drastisch reduziert ist. Diese Arbeit stellt einen weiteren, erfolgreichen Schritt in diese Richtung dar.

## 10 Literaturverzeichnis

- Akademischer Spektrum Verlag (2002): Lexikon der Geowissenschaften: Heidelberg.
- Ahlgren, S.; Holmlund, J. (2003): Using 3-D outcrop laserscan for fracture analysis. In: *American Association of Petroleum Geologists Search and Discovery Article 40099*.
- Aretz, A. (2016): Aufschlussanalogstudie zur geothermischen Reservoircharakterisierung des Permokarbons im nördlichen Oberrheingraben. Darmstadt: [Dissertation].
- Bahrami, H.; Rezaee, R.; Hossain, M. (2012): Characterizing natural fractures productivity in tight gas reservoirs. In: *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology* 2 (2), S. 107–115.
- Bandis, S. C.; Lumsden, A. C.; Barton, N. R. (1983): Fundamentals of rock joint deformation. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 20 (6), S. 249–268.
- Bär, K. (2012): Untersuchung der tiefeingeothermischen Potenziale von Hessen. Darmstadt [Dissertation]
- Barton, N. R. (1972): A model study of rock-joint deformation. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 9 (5), S. 579–582.
- Becker, S.; Nguyen, H. T.; Nollet, S.; Fernandez-Steeger, T. M.; Laux, D.; Hilgers, C. (2014): Methods to analyse fracture orientation patterns in a Lower Carboniferous carbonate reservoir analogue in the Voreifel, Germany. In: *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften* 165 (3), S. 319–330.
- Bigi, S.; Battaglia, M.; Alemanni, A.; Lombardi, S.; Campana, A.; Borisova, E.; Loizzo, M. (2013): CO<sub>2</sub> flow through a fractured rock volume: Insights from field data, 3D fractures representation and fluid flow modeling. In: *International Journal of Greenhouse Gas Control* 18, S. 183–199.
- Bisdom, K.; Gauthier, B. D.M.; Bertotti, G.; Hardebol, N. J. (2014): Calibrating discrete fracture-network models with a carbonate three-dimensional outcrop fracture network: Implications for naturally fractured reservoir modeling. In: *AAPG Bulletin* 98 (7), S. 1351–1376.
- Blum, P.; Mackay, R.; Riley, M. S.; Knight, J. L. (2007): Hydraulische Modellierung und die Ermittlung des repräsentativen Elementarvolumens (REV) im Kluftgestein. In: *Grundwasser* 12 (1), S. 48–65.
- Bratton, T.; Canh, D. V.; van Que, N.; Duc, N. V.; Gillespie, P.; Hunt, D. et al. (2006): The nature of naturally fractured reservoirs. In: *Oilfield Review* 18 (2), S. 4–23.
- Brodu, N.; Lague, D. (2012): 3D terrestrial lidar data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: Applications in geomorphology. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 68, S. 121–134.
- Buckley, S. J.; Howell, J. A.; Enge, H. D.; Kurz, T. H. (2008): Terrestrial laser scanning in geology: data acquisition, processing and accuracy considerations. In: *Journal of the Geological Society* 165 (3), S. 625–638.
- Burg, J.-P (2014): Einführung in die Strukturgeologie. ETH Zürich. Zürich.
- Burton, D.; Dunlap, D. B.; Wood, L. J.; Flaig, P. P. (2011): Lidar intensity as a remote sensor of rock properties. In: *Journal of Sedimentary Research* 81 (5), S. 339–347.
- Cacas, M. C.; Daniel, J. M.; Letouzey, J. (2001): Nested geological modelling of naturally fractured reservoirs. In: *Petroleum Geoscience* 7 (S), S. S43-S52.
- Clar, E. (1954): Ein zweikreisiger Geologen-und Bergmannskompaß zur Messung von Flächen und Linearen. In: *A two-circle compass for geologists and miners\* for measuring of planes and linears*, S. 201–215.
- Clauset, A.; Shalizi, C. R.; Newman, M. E. J. (2009): Power-law distributions in empirical data. In: *SIAM review* 51 (4), S. 661–703.
- COLTOP 3D: A software dedicated to analyze relief using large DEM and massive 3D-imaging cloud points (2008). Geophys. Res. Abstr.
- Cruden, D. M.; Hu, X. Q. (1988): Basic friction angles of carbonate rocks from Kananaskis country, Canada. In: *Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur* 38 (1), S. 55–59.
- Cruden, D. M. (1977): Describing the size of discontinuities. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 14 (3), S. 133–137.

- Decker, J. B.; Mauldon, M.; Wang, X. (2006): Real-time determination of fracture size and shape using trace data on tunnel walls. Safety in the Underground Space - Proceedings of the ITA-AITES 2006 World Tunnel Congress and 32nd ITA General Assembly. In: *Tunnelling and Underground Space Technology* 21 (3–4), S. 233.
- Dershowitz, W. S. (2012): Fracture Aperture Correlation. 46th U.S. Rock Mechanics Geomechanics Symposium. American Rock Mechanics Association. Chicago, 24.06.2012.
- Dershowitz, W. S.; La Pointe, P. R. (Hg.) (2007): Discrete fracture network modelling for carbonate rock.
- Dershowitz, W. S.; La Pointe, P. R.; Einstein, H. H.; Eiben, T.; Wadleigh, E.; Ivanova, V. (1998): Fractured reservoir discrete fracture network technologies. Final Report. Hg. v. Golder Associates. National Petroleum Technology Office - US Department of Energy. Redmond, Washington.
- Dershowitz, W. S.; Herda, H. H.: Interpretation of Fracture Spacing and Intensity. In: Proc. 32nd US Rock Mech. Symp., S.757-766.
- Dershowitz, W. S.; La Pointe, P. R.; Doe, T. W. (Hg.) (2004): Advances in discrete fracture network modeling. Proceedings of the US EPA/NGWA Fractured Rock Conference. Portland, 2004. US EPA/NGWA.
- Dershowitz, W.S.; La Pointe, P.R.; Einstein, H. H.; Eiben, T.; Wadleigh, E.; Ivanova, V. (1998): Fractured reservoir discrete fracture network technologies. Final Report. Hg. v. Golder Associates. National Petroleum Technology Office - US Department of Energy. Redmond, Washington.
- Deutsches Institut für Normung (2011): Benennung und Beschreibung (ISO 14689-1:2003) ; Deutsche Fassung EN ISO 14689-1:2003. Juni 2011. Berlin: Beuth (Deutsche Normen, DIN EN ISO 14689-1).
- Röhr, C. (2006): Geologische Übersichtskarte des Oberrheingrabens. Online verfügbar unter [http://www.oberrheingraben.de/Graben/Geologische\\_Karte.htm](http://www.oberrheingraben.de/Graben/Geologische_Karte.htm). [Stand 25.05.2016]
- Du, J.-C.; Teng, H.-C. (2007): 3D laser scanning and GPS technology for landslide earthwork volume estimation. In: *Automation in Construction* 16 (5), S. 657–663.
- Eberhardt, E.; Stead, D.; Morrison, T. (2007): Rock Mechanics: Meeting Society's Challenges and Demands, Two Volume Set: Proceedings of the 1st Canada-US Rock Mechanics Symposium, Vancouver, Canada, 27–31 May 2007: CRC Press.
- EDF R&D (2014): CloudCompare [GPL Software]: Telecom ParisTech. Online verfügbar unter <http://www.danielgm.net/cc/>. [Stand 25.05.2016]
- Elmo, D.; Stead, D. (2010): An integrated numerical modelling–discrete fracture network approach applied to the characterisation of rock mass strength of naturally fractured pillars. In: *Rock Mechanics and Rock Engineering* 43 (1), S. 3–19.
- Enge, H. D.; Buckley, S. J.; Rotevatn, A.; Howell, J.A (2007): From outcrop to reservoir simulation model: Workflow and procedures. In: *Geosphere* 3 (6), S. 469–490.
- Ester, M.; Sander, J. (2013): Knowledge discovery in databases: Techniken und Anwendungen: Springer-Verlag.
- Fekete, S.; Diederichs, M. (2013): Integration of three-dimensional laser scanning with discontinuum modelling for stability analysis of tunnels in blocky rockmasses. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 57, S. 11–23.
- Fekete, S.; Diederichs, M.; Lato, M. (2010): Geotechnical and operational applications for 3-dimensional laser scanning in drill and blast tunnels. In: *Tunnelling and Underground Space Technology* 25 (5), S. 614–628.
- Ferrero, A. M.; Forlani, G.; Roncella, R.; Voyat, H. I. (2009): Advanced Geostructural Survey Methods Applied to Rock Mass Characterization. In: *Rock Mech Rock Eng* 42 (4), S. 631–665.
- Fischler, M. A.; Bolles, R. C. (1981): Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. In: *Communications of the ACM* 24 (6), S. 381–395.
- Fisher, N. I.; Lewis, T.; Embleton, B. J. J. (1987): Statistical analysis of spherical data: Cambridge university press.
- Fossen, H. (2010): Structural geology: Cambridge University press.



- FracMan® Fractured Reservoir Analysis & Modelling (2013). Fracman Technology Group. Golder Associates. Celle, 23.10.2013.
- Franceschi, M.; Teza, G.; Preto, N.; Pesci, A.; Galgaro, A.; Girardi, S. (2009): Discrimination between marls and limestones using intensity data from terrestrial laser scanner. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64 (6), S. 522–528.
- Gaich, A.; Pötsch, M.; Schubert, W. (Hg.) (2006): Acquisition and assessment of geometric rock mass features by true 3D images.
- Gauthier, B. D. M., Bisdom K.; Bertotti, G. (2012): Modeling 3D Fracture Network in Carbonate NFR: Contribution from an Analogue Dataset, the Cante Perdix Quarry, CALvisson, SE France. Search and Discovery Article. AAPG Hedberg Conference. Saint-Cyr Sur Mer, Provence, France, 08.07.2012.
- General, E. D.; Mollema, P.; Antonellini, M. (2012): Evaluation of a Discrete Fracture Network (DFN) model and comparison with fractured carbonate outcrops, Monte Conero, Italy.
- Geyer, G. (2002): Geologie von Unterfranken und angrenzenden Regionen: Klett-Perthes.
- Golder Associates (1999-2015): Fracman: Golder Associates.
- Golder Associates (2014): FracMan 7.5 Workshop, 25.02.2014.
- Golder Associates (2015): FracMan 7 User Documentation. Hg. v. Golder Associates.
- Gong, B. (2007): Effective models of fractured systems (68).
- González de Vallejo, L. I.; Ferrer, M. (2011): Geological engineering. Boca Raton, Fla.: CRC Press Balkema (A Balkema book).
- Grimm, M. C.; Wielandt-Schuster, U.; Hottenrott, M.; Radtke, G.; Berger, J.-P.; Ellwanger, D. et al. (2011): Oberrheingraben (Tertiär des Oberrheingrabens). In: *Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, S. 57–132.
- Hack, H. (1996): Slope stability probability classification, SSPC. Delft: International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC) (ITC publication, nr. 43).
- Hagdorn, H.; Simon, T. (2005): Der Untere und Mittlere Muschelkalk im Taubergebiet und im Bauland (Exkursion C am 31. März 2005). In: *Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereins*, S. 97–112.
- Haneberg, W. C. (2008): Using close range terrestrial digital photogrammetry for 3-D rock slope modeling and discontinuity mapping in the United States. In: *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 67 (4), S. 457–469.
- Hartzell, P.; Glennie, C.; Biber, K.; Khan, S. (2014): Application of multispectral LiDAR to automated virtual outcrop geology. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 88, S. 147–155.
- Horn, Berthold K. P. (1987): Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions. In: *JOSA A* 4 (4), S. 629–642.
- Hu, H.; Fernandez-Steege, T. M.; Dong, M.; Nguyen, H.; Azzam, R. (2010): 3D Modeling using LiDAR data and its geological and geotechnical applications, S. 1–6.
- Hudson, J. A.; Harrison, J. P. (1997): Engineering rock mechanics. Oxford: Elsevier.
- Hudson, J. A. (1981): Wave speeds and attenuation of elastic waves in material containing cracks. In: *Geophysical Journal International* 64 (1), S. 133–150.
- ISTI - CNR (2013): Meshlab.
- Jaboyedoff, M.; Oppikofer, T.; Abellán, A.; Derron, M.-H.; Loye, A.; Metzger, R.; Pedrazzini, A. (2012): Use of LIDAR in landslide investigations: a review. In: *Nat Hazards* 61 (1), S. 5–28.
- Jaboyedoff, M.; Oppikofer, T.; Minoia, R. (2008): Terrestrial Lidar investigation of the 2004 rockslide along Petit Champlain Street, Québec City (Quebec, Canada).
- Jaeger, J. C.; Cook, N. G. W.; Zimmerman, R. W. (2007): Fundamentals of rock mechanics. 4. ed. Malden Mass. u.a.: Blackwell Publ.
- Jin, W.; Gao, M.; Zhang, R.; Zhang, G. (2014): Analytical expressions for the size distribution function of elliptical joints. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 70, S. 201–211.
- Jodocy, M.; Stober, I. (2011): Porositäten und Permeabilitäten im Oberrheingraben und Südwestdeutschen Molassebecken. In: *Erdöl, Erdgas, Kohle* 127 (1), S. 20.

- Kalenchuk, K. S.; Diederichs, M. S.; McKinnon, S. (2006): Characterizing block geometry in jointed rockmasses. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 43 (8), S. 1212–1225.
- Kassebaum, T. J. (2012): Using LiDAR as a monitoring device to calculate volume of rockfall over time.
- Kaufman, L.; Rousseeuw, P. J. (1990): Finding Groups in Data. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Kazemi, H.; Merrill Jr, L. S.; Porterfield, K. L.; Zeman, P. R. (1976): Numerical Simulation of Water-Oil Flow in Naturally Fractured Reservoirs. In: *Society of Petroleum Engineers Journal* 16 (06), S. 317–326.
- Kemeny, J.; Donovan, J. (2005): Rock mass characterization using LiDAR and automated point cloud processing. In: *Ground Engineering* 38 (11), S. 26–29.
- Kemeny, J. (2008): Ground-based lidar: rock slope mapping and assessment: Central Federal Lands Highway Division.
- Kern, F. (2007): Terrestrisches Laserscanning kurz und bündig. In: *Fachhochschule Mainz i3mainz-Institut für Raumbezogene Informations-und Messtechnik*.
- Klimczak, C.; Schultz, R. A.; Parashar, R.; Reeves, D. M. (2010): Cubic law with aperture-length correlation: implications for network scale fluid flow. In: *Hydrogeology Journal* 18 (4), S. 851–862.
- Konzan, H. P.: Die Geologie des Ensheimer Tales. Online verfügbar unter <http://www.ensheim-saar.de/get2.htm>. [Stand 25.05.2016]
- Kulatilake, P. H. S. W.; Wu, T. H. (1984): Estimation of mean trace length of discontinuities. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. In: *Rock Mech Rock Engng* 17 (4), S. 215–232.
- La Pointe, P. R.; Eiben, T.; Dershowitz, W.; Wadleigh, E. (1997): Compartmentalization analysis using discrete fracture network models. BDM Oklahoma, Inc., Bartlesville, OK (United States).
- La Pointe, Paul R.; Wallmann, Peter C.; Dershowitz, Williams S. (Hg.) (1993): Stochastic estimation of fracture size through simulated sampling: Elsevier (30).
- Lai, W. (2012): Fitting Power Law Distributions to Data. University of California, Berkeley. Department of Statistics. Online verfügbar unter <http://www.stat.berkeley.edu/110>, zuletzt geprüft am 02.04.2013.
- Lacerda, W. A. (2004): Landslides. Evaluation and stabilization : proceedings of the ninth International symposium on landslides, June 28 to July 2, 2004, Rio de Janeiro = Glissements de terrain : evaluation et stabilization : comptes rendus du neuvieme Symposium international sur les glissements de terrain, 28 Jun Jusqu' à 2 Julliet 2004. Leiden [etc.]: A. A. Balkema Publishers.
- Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland Pfalz (Hg.): Stratigraphische Übersicht des Buntsandsteins. Online verfügbar unter <http://www.lgb-rlp.de/fileadmin/extern/stratigraphie/rlp/litho/tri/bunt/buntsand.pdf>. [Stand 25.05.2016]
- Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (2010): Aufschlussdatenbank des LGRB. Speicherkomplex mo (Oberer Muschelkalk). Hg. v. Regierungspräsidium Freiburg.
- Lato, M.; Diederichs, M. S.; Hutchinson, D. J.; Harrap, R. (2009): Optimization of LiDAR scanning and processing for automated structural evaluation of discontinuities in rockmasses. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 46 (1), S. 194–199.
- Lato, M. J.; Diederichs, M. S.; Hutchinson, D. Jean (2010): Bias correction for view-limited Lidar scanning of rock outcrops for structural characterization. In: *Rock Mechanics and Rock Engineering* 43 (5), S. 615–628.
- Lato, M. J.; Vöge, M. (2012): Automated mapping of rock discontinuities in 3D lidar and photogrammetry models. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 54 (0), S. 150–158.
- Lee, C.-H.; Farmer, I. W. (1993): Fluid flow in discontinuous rocks: Chapman & Hall.
- Li, J.; Du, C. M.; Zhang, X. (2011): Represented Reservoirs - Schlumberger. In: *Oilfield Technology* 2011.
- MacQueen, J. (1967): Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In: Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability, Bd. 14. Fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability: California, USA (14), S. 281–297.

- Mah, J.; Samson, C.; McKinnon, S. D. (2011): 3D laser imaging for joint orientation analysis. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 48 (6), S. 932–941.
- Mauldon, M. (1998): Estimating mean fracture trace length and density from observations in convex windows. In: *Rock Mechanics and Rock Engineering* 31 (4), S. 201–216.
- Mauldon, M.; Dershowitz, W. (2000): A Multi-Dimensional System of Fracture Abundance Measures. Geological Society of America Annual Meeting. Reno, Nevada, November 2000.
- Mauldon, M.; Dunne, W. M.; Rohrbaugh, M. B., JR. (2001): Circular scanlines and circular windows: new tools for characterizing the geometry of fracture traces. In: *Journal of Structural Geology* 23 (2–3), S. 247–258.
- Mauldon, M. S.; Rohrbaugh, M. B. S.; Dunne, W. M. S.; Lawdermilk, W. S. (Hg.) (1999): Mean fracture trace length and density estimators using circular windows: American Rock Mechanics Association.
- Mavko, G.; Mukerji, T.; Dvorkin, J. (2009): The Rock Physics Handbook. Tools for Seismic Analysis of Porous Media. Cambridge: Cambridge university press.
- Melin, H. (2012): Controlling parameters for normal and shear behaviour of rock fractures-a study of direct shear test data from SKB.
- Meschede, M. (1994): Methoden der Strukturgeologie. Ein Leitfaden zur Aufnahme und Auswertung strukturgeologischer Daten im Gelände und im Labor. Stuttgart: Enke.
- Nelson, R. (2001): Geologic analysis of naturally fractured reservoirs: Gulf Professional Publishing.
- Oda, Mc (1984): Elastic compliance for rock-like materials with random cracks. In: *土質工学会論文報告集* 24 (3), S. 27–40.
- Oda, Mc (1985): Permeability tensor for discontinuous rock masses. In: *Geotechnique* 35 (4), S. 483–495.
- Ortoleva, P. J. (Hg.) (1994): Basin compartments and seals. Tulsa, Okla: The American Association of Petroleum Geologists (AAPG memoir, 61).
- Pahl, P. J. (1981): Estimating the mean length of discontinuity traces. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 18 (3), S. 221–228.
- Painter, S. (2011): Development f Discrete Fracture Network Modeling Capability. Fall 2011 Board Meeting. Nuclear Waste Technical Review Board. Salt Lake City, Utah, 13.09.2011
- Pearce, M. A.; Jones, R. R.; Smith, S. A. F.; Mccaffrey, K. J. W. (2011): Quantification of fold curvature and fracturing using terrestrial laser scanning. In: *AAPG Bulletin* 95 (5), S. 771–794.
- Petit, J. P.; Massonat, G.; Pueo, F.; Rawnsley, K. (1994): Rapport de forme des fractures de mode i dans les roches stratifiées: une étude de cas dans le bassin permien de lodeve (france). In: *Bulletin Elf Aquitaine Production* 18, S. 211–229.
- Priest, S. D. (1993): Discontinuity analysis for rock engineering. 1. Aufl. London, New York: Chapman & Hall.
- Priest, S. D. (2004): Determination of Discontinuity Size Distributions from Scanline Data. In: *Rock Mechanics and Rock Engineering* 37 (5), S. 347–368.
- Priest, S. D.; Hudson, J. A. (1981): Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 18 (3), S. 183–197.
- R Core Team (2013): R: A Language and Environment for Statistical. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- Referat Energieressourcen Erdöl und Erdgas (Hg.) (2013): Erdöl und Erdgas in der Bundesrepublik Deutschland 2012. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie. Hannover.
- Reiss, Louis H. (1980): The reservoir engineering aspects of fractured formations: Editions Technip (3).
- Reshetyuk, Y. (2006): Investigation and calibration of pulsed time-of-flight terrestrial laser scanners.
- Riegl LMS (2013): RiSCAN Pro. Horn, Österreich: Riegl LMS.
- Riegl LMS (2014): Datasheet Riegl VZ400. Hg. v. Riegl LMS.
- Rohrbaugh Jr, M. B.; Dunne, W. M.; Mauldon, M. (2002): Estimating fracture trace intensity, density, and mean length using circular scan lines and windows. In: *AAPG Bulletin* 86 (12), S. 2089–2104.
- Sarkar, S.; Toksoz, M. N.; Burns, D.I R. (2004): Fluid flow modeling in fractures.

- Sayers, C. M. (2002): Fluid-dependent shear-wave splitting in fractured media. In: *Geophysical Prospecting* 50 (4), S. 393–401.
- Schellart, W. P. (2000): Shear test results for cohesion and friction coefficients for different granular materials: scaling implications for their usage in analogue modelling. In: *Tectonophysics* 324 (1), S. 1–16.
- Schnabel, R.; Wahl, R.; Klein, R. (2007): Efficient RANSAC for Point-Cloud Shape Detection. In: *Computer Graphics Forum* 26 (2), S. 214–226.
- Schoenberg, M.; Sayers, C. M. (1995): Seismic anisotropy of fractured rock. In: *Geophysics* 60 (1), S. 204–211.
- Singewald, C. (1992): Naturwerkstein: Exploration und Gewinnung; Untersuchung, Bewertung, Verfahren, Kosten: Müller.
- Singhal, B. B. S.; Gupta, R. P. (2010): Applied hydrogeology of fractured rocks: Springer Science & Business Media.
- Slob, S.; van Knapen, B.; Hack, R.; Turner, K.; Kemeny, J. (2005): Method for automated discontinuity analysis of rock slopes with three-dimensional laser scanning. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1913 (-1), S. 187–194.
- Slob, S. (2010): Automated rock mass characterisation using 3-D terrestrial laser scanning. [S.l.: s.n.] (ITC dissertation, 172).
- Snow, D. T. (1965): A parallel plate model of fractured permeable media: University of California, Berkeley.
- Split Engineering LLC (2010): SplitFX. Online verfügbar unter <http://www.spliteng.com/split-fx/>. [Stand 25.05.2016]
- Stober, I.; Jodocy, M. (2009): Eigenschaften geothermischer Nutzhorizonte im baden-württembergischen und französischen Teil des Oberrheingrabens. In: *Grundwasser* 14 (2), S. 127–137.
- Strouth, A.; Eberhardt, E.; Hungr, O. (2005): The use of LiDAR to overcome rock slope hazard data collection challenges at Afternoon Creek, Washington.
- Sturzenegger, M.; Stead, D. (2009): Quantifying discontinuity orientation and persistence on high mountain rock slopes and large landslides using terrestrial remote sensing techniques. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9 (2), S. 267–287.
- Sturzenegger, M.; Stead, D. (2009b): Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. In: *Engineering Geology* 106 (3–4), S. 163–182.
- Sturzenegger, M.; Stead, D.; Elmo, D. (2011): Terrestrial remote sensing-based estimation of mean trace length, trace intensity and block size/shape. In: *Engineering Geology*.
- Tauxe, L.; Banerjee, S. K.; Butler, R. F.; van der Voo, R. (2013): Essentials of paleomagnetism: second web edition.
- Terzaghi, R. D. (1965): Sources of error in joint surveys. In: *Geotechnique* 4 (3).
- Thiel, K.-H.; Wehr, A.; Hug, C. (2005): A new Algorithm for Processing Fullwave Laser Scanner Data.
- Tiab, D.; Donaldson, E. C. (2011): Petrophysics: theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties: Gulf Professional Publishing.
- Tiab, D.; Restrepo, D. P.; Igbokoyi, A. O. (Hg.) (2006): Fracture porosity of naturally fractured reservoirs: Society of Petroleum Engineers.
- TU Graz (2007): Skriptum - Felsmechanik und Tunnelbau. Unter Mitarbeit von Wulf Schubert. Hg. v. Institut für Felsmechanik und Tunnelbau. Online verfügbar unter [http://tu-freiberg.de/sites/default/files/media/professur-fuer-ingenieurgeologie-6559/einfngt\\_bome3.pdf](http://tu-freiberg.de/sites/default/files/media/professur-fuer-ingenieurgeologie-6559/einfngt_bome3.pdf).
- Vöge, M.; Lato, M. J.; Diederichs, M. S. (2013): Automated rockmass discontinuity mapping from 3-dimensional surface data. In: *Engineering Geology* 164 (0), S. 155–162.
- Wallbrecher, E. (1986): Tektonische und gefuegeanalytische Arbeitsweisen. Graphische, rechnerische und statistische Verfahren. Stuttgart: Enke.
- Wang, S.; Fu, B.; Li, Z. (2001): Frontiers of Rock Mechanics and Sustainable Development in the 21st Century: Proceedings of the 2001 ISRM International Symposium, 2nd Asian Rock Mechanics Symposium (ISRM 2001-2nd ARMS), 11-14 September 2001, Beijing, China: AA Balkema.

- Wang, X. (2005): Stereological interpretation of rock fracture traces on borehole walls and other cylindrical surfaces. Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Warburton, P. M. (1980b): Stereological interpretation of joint trace data: Influence of joint shape and implications for geological surveys. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 17 (6), S. 305–316.
- Warburton, P. M. (1980): A stereological interpretation of joint trace data. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 17 (4), S. 181–190.
- Warren, J. E.; Root, P.J (1963): The behavior of naturally fractured reservoirs. In: *Old SPE Journal* 3 (3), S. 245–255.
- Wenke, A.; Bechstädt, T.; Greiner, G.; Kowalczyk, G.; Philipp, S.; Reinecker, J. et al. (2011): Projekt AuGE–Aufschlussanalogstudien und ihre Anwendbarkeit in der Geothermischen Exploration. In: *Beitrag „Der Geothermiekongress“*.
- Will, R.; Archer, R. A.; Dershowitz, W. S. (2005): Integration of seismic anisotropy and reservoir performance data for characterization of naturally fractured reservoirs using discrete feature network models. In: *SPE Reservoir Evaluation & Engineering* 8 (02), S. 132–142.
- Wilson, C. E.; Aydin, A.; Karimi-Fard, M.; Durlofsky, L. J.; Amir, S.; Brodsky, E. E. et al. (2011): From outcrop to flow simulation. Constructing discrete fracture models from a LIDAR survey. In: *AAPG Bulletin* 95 (11), S. 1883.
- Witherspoon, P. A.; Wang, J. S.Y.; Iwai, K.; Gale, J. E. (1979): Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture. Technical information report No. 23. California Univ., Berkeley (USA). Lawrence Berkeley Lab.
- Wu, Q.; Kulatilake, P. H. S. W.; Tang, H. (2011): Comparison of rock discontinuity mean trace length and density estimation methods using discontinuity data from an outcrop in Wenchuan area, China. In: *Computers and Geotechnics* 38 (2), S. 258–268.
- Wyllie, Duncan C.; Mah, Chris (2004): Rock slope engineering: CRC Press.
- Zangerl, C.; Evans, K. F.; Eberhardt, E.; Loew, S. (2008): Normal stiffness of fractures in granitic rock: a compilation of laboratory and in-situ experiments. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 45 (8), S. 1500–1507.
- Zeeb, C.; Gomez-Rivas, E.; Bons, P. D.; Blum, P. (2013): Evaluation of Sampling Methods for Fracture Network Characterization Using Outcrops. In: *AAPG Bulletin* (20,130,218).
- Zhang, L. (2005): Engineering Properties of Rocks: Elsevier. Online verfügbar unter [https://books.google.de/books?id=2Le\\_3xFG2GAC](https://books.google.de/books?id=2Le_3xFG2GAC).
- Zhang, L.; Einstein, H. H. (1998): Estimating the mean trace length of rock discontinuities. In: *Rock Mechanics and Rock Engineering* 31 (4), S. 217–235.
- Zhang, L.; Einstein, H. H.; Dershowitz, W. S. (2002): Stereological relationship between trace length and size distribution of elliptical discontinuities. In: *Geotechnique* 52 (6), S. 419–433.
- Zhang, L.; Einstein, H. H. (2000): Estimating the intensity of rock discontinuities. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 37 (5), S. 819–837.
- Zhang, L.; Einstein, H. H. (2010): The planar shape of rock joints. In: *Rock Mechanics and Rock Engineering* 43 (1), S. 55–68.
- Zoback, M. D. (2007): Reservoir geomechanics: Cambridge Univ Pr.

## 11 Anhang

### 11.1 Verzeichnis der Anhänge

11.... Anhang	218
11.1 Verzeichnis der Anhänge	218
11.2 Inhalt DVD	218
11.2.1 Übersicht mathematische Skripte aus R	218
11.2.2 Fracman Modelle:	219
11.2.3 Punktwolken: als ASCII Daten	219
11.2.4 Videos	220
11.3 Anhang Intensität	220
11.3.1 Genaue Auflistung aller Umformungen zur Berechnung der Schnittpunkte von Scanline und Ebene	220
11.3.2 Beschreibung des Excel Skripts zur Berechnung der Schnittpunkte	222
11.3.3 Bestimmung P32 in Excel	222
11.3.4 Berechnung der einzelnen Abstände zwischen den Kluftflächen	222
11.4 Anhang Größe	223
11.4.1 Schar NW-SE $h_{\max}$	223
11.4.2 Schar NW-SE $l_{\max}$	227
11.4.3 Schar WNW-ESE $h_{\max}$	230
11.4.4 Schar WNW-ESE $l_{\max}$	233
11.4.5 Zusätzliche Statistik der Flächen der Schar NE-SW	237
11.4.6 Kumulative Verteilungsfunktionen der 3 Kluftscharen	239
11.5 Anhang DFN Modelle	245

### 11.2 Inhalt DVD

Die beiliegende DVD beinhaltet die Dissertation im PDF-Format sowie die im Folgenden aufgelisteten Skripte, Modelle und Videos.

#### 11.2.1 Übersicht mathematische Skripte aus R

##### ***Orientierung***

- Auswertung der Normalenvektoren: Berechnung von Einfallswinkel und Einfallsrichtung aus  $n_x$ ,  $n_y$  und  $n_z$  Daten: **Normalenauswertung.R**.
- **MultivariateNormalvertOrient.R**: Überprüfung der multivariaten Normalverteilung der Orientierungsdaten und Darstellung in einem 3D-Plot.
- **Testnormal.R**: Test nach Shapiro inklusive graphischer Darstellung.

##### ***Kluftintensität:***

- **Euklidische DistanzIntensität.R**: Skript zur Berechnung der euklidischen Distanz zwischen Punktwolke und ausgewählten Referenzpunkte zur Auffindung eines „Intensitätswerts“ als Zuordnung für jeden Punkt der Wolke.



- **IntEllipsenFreiErläuterungen.xlsm:** Berechnung der Intensität P10 und P32 bei freier Ausrichtung angenommener Ellipsen (über Vektor q).

### *Statistische Auswertung*

- **StatistischeAuswertungFläche.R:** Statistische Übersicht für Längendaten.
- **StatistischeAuswertungLänge.R:** Statistische Übersicht für Flächendaten.
- **TestVerteilung.R:** Prüfung der Nullhypothesen für verschiedene Dichtefunktionen und plotten der Ergebniskurven.
- **VglBoxplotHoheLange.R:** Vergleich der Boxplots von Höhen (hmax) und Längendaten (lmax).

### *Kluftgröße*

- **GeometrienausRansac.R:** Berechnung des Mittelpunkts, der Orientierung und der diagonalen Länge (Größe) der mit einem RANSAC Algorithmus identifizierten Flächen (definiert nur durch Eckpunkte).
- **GeometrienausRansac2.R:** Berechnung des Mittelpunkts, der Orientierung (Trend/Plunge), des Seitenverhältnisses, des Flächeninhalts und der diagonalen Länge der mit einem RANSAC Algorithmus identifizierten Flächen (definiert nur durch Eckpunkte).
- **lmax.R:** Berechnung des Parameters  $l_{\max}$  aus Flächendaten (RANSAC).
- **hmax.R:** Berechnung des Parameters  $h_{\max}$  aus Flächendaten (RANSAC).

### **11.2.2 Fracman Modelle:**

- **FracmanEberstadt.frd:** Ausgangsmodell.
- **FracManEberstadt\_v06kleinesGridBlockk.frd:** Permeabilitätsberechnungen nach Block k Methode.
- **FracManEberstadt\_v04Tunnel.frd:** Tunnelstabilitätsberechnungen.
- **FracManEberstadt\_v06Blöcke.frd:** Blockgrößenberechnungen.
- **FracManEberstadt\_v06großesGrid.frd:** hydraulische Berechnungen für Gesamtmodell.
- **FracManEberstadt\_v06kleinesGrid.frd:** hydraulische Berechnungen in Auswahlgrid.
- **FracManEberstadt\_v06Schichtung.frd:** Modell inklusiver einer Schichtung.
- **FracManEberstadt\_EModul.frd:** Geomechanische Berechnungen.

### **11.2.3 Punktwolken: als ASCII Daten**

- **RömersteinbruchPW.txt:** Punktwolkenmodell des Römersteinbruchs.
- **Steinbruch Rockenau.txt:** Punktwolkenmodell des Steinbruchs Rockenau.
- **Steinbruch Eberstadt.txt:** Punktwolkenmodell des Steinbruchs Eberstadt.

### **11.2.4 Videos**

Animierte Visualisierung der Steinbrüche Rockenau und Eberstadt sowie des Römersteinbruchs.

**11.3 Anhang Intensität****11.3.1 Genaue Auflistung aller Umformungen zur Berechnung der Schnittpunkte von Scanline und Ebene**

Gleichsetzen der Ebenengleichung und der Geradengleichung zur Berechnung des Ortsvektors, und somit Schnittpunkts, S:

$$\vec{y} = \vec{A} + \lambda \vec{O} \quad \text{und} \quad \vec{n}[\vec{P} - \vec{C}] = 0 \quad 11.1$$

$$\vec{y}_S = \vec{A} + \lambda_S \vec{O} = \vec{S} \quad \text{und} \quad \vec{n}[\vec{S} - \vec{C}] = 0 \quad 11.2$$

$$0 = \vec{n} [\vec{A} + \lambda_S \vec{O} - \vec{C}] \quad 11.3$$

$$\vec{y} = \vec{A} + \lambda \vec{O} \quad \text{und} \quad \vec{n}[\vec{P} - \vec{C}] = 0 \quad 11.4$$

$$\vec{y}_S = \vec{A} + \lambda_S \vec{O} = \vec{S} \quad \text{und} \quad \vec{n}[\vec{S} - \vec{C}] = 0 \quad 11.5$$

$$0 = \vec{n} [\vec{A} + \lambda_S \vec{O} - \vec{C}] \quad 11.6$$

$$0 = \vec{n} [\vec{A} + \lambda_S (\vec{B} - \vec{A}) - \vec{C}] \quad 11.7$$

$$0 = \vec{n} \vec{A} + \vec{n} \lambda_S (\vec{B} - \vec{A}) - \vec{n} \vec{C} \quad 11.8$$

$$\lambda_S = \frac{\vec{n} \vec{C} - \vec{n} \vec{A}}{\vec{n} (\vec{B} - \vec{A})} \quad 11.9$$

$$\lambda_S = \frac{\vec{n}\vec{C} - \vec{n}\vec{A}}{\vec{n}(\vec{B} - \vec{A})} \text{ einsetzen in } \vec{y}_S = \vec{A} + \lambda_S \vec{O} = \vec{S} \quad 11.10$$

$$\vec{S} = \vec{A} + \frac{\vec{n}\vec{C} - \vec{n}\vec{A}}{\vec{n}(\vec{B} - \vec{A})} \vec{O} = \vec{A} + \frac{\vec{n} * (\vec{C} - \vec{A})}{\vec{n} * (\vec{B} - \vec{A})} (\vec{B} - \vec{A}) \quad 11.11$$

$$\vec{S} = \vec{A} + \frac{\vec{n} * (\vec{C} - \vec{A})}{\vec{n} * (\vec{B} - \vec{A})} (\vec{B} - \vec{A}) \quad \mathbf{n, A, B, S, C} \in \mathbf{R^3} \quad 11.12$$

### 11.3.2 Beschreibung des Excel Skripts zur Berechnung der Schnittpunkte

Excel prüft als Erstes, ob  $r > d$  ist über eine Bedingungsabfrage (Wenn-Funktion). Sollte dies der Fall sein, gibt Excel den Wert „Ja“ aus. Nur dann wird der Schnittpunkt weiterhin berücksichtigt. Die aus SplitFX in den Ausgangsdaten enthaltenen Einfallrichtungen der Flächen werden in Streichrichtungen umgerechnet. Die Differenz der Streichrichtungen zur Orientierung der Scanline wird berechnet. Nun wird der Mittelwert all dieser Differenzen als Absolutwert quantifiziert. Das Ergebnis ist der Terzaghi-Faktor  $\epsilon$ . Dieser wird benötigt, um die Distanzen bzw. Abstände  $d$  zu korrigieren über:

$$d(korr) = d * \sin(\epsilon) \quad 11.13$$

Hierbei wird nur die Summe der gesamten Distanzen korrigiert und nicht jeder Wert einzeln.

Die Orientierung der Scanline berechnet sich aus den beiden Vektoren A und B. Der Ortsvektor ergibt sich aus der Differenz der beiden Vektoren A-B. Diese Orientierung ermittelt sich analog zur Berechnung der Einfallrichtung von Normalenvektoren über:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{x}{y}\right) * \operatorname{sgn}(z) \quad 11.14$$

Mehrere verschachtelte Bedingungen (Wenn-Funktionen) sind für Ausnahmefälle (x und/oder y sind 0, z positiv oder negativ, das Ergebnis des Winkels ist negativ) notwendig.

Der Quotient aus der Anzahl der Schnittpunkte (Zählenwenn-Funktion) und die Gesamtdistanz der Scanline ergibt die Kluftdichte. Die Länge der Scanline wird über eine kombinierte Index- und Vergleichsfunktion ermittelt. Der minimale und maximale Z-Wert wird zunächst ermittelt und die zugehörigen x- und y-Werte hinzugefügt. Daher muss die Einschränkung hingenommen werden, dass die gewählte Scanline nicht horizontal verlaufen kann, sondern eine minimale Abweichung der z-Werte von Vektor A und B vorhanden sein muss.

### 11.3.3 Bestimmung P32 in Excel

Die benötigten Ausgangsdaten zur Berechnung werden in das Excelskript übertragen, dazu gehören,

- der zuvor berechnete eindimensionale **Intensitätsparameter P10**,
- die **Fisher-Konstante  $\kappa$** , die über das stereographische Auswertungsprogramm Stereo32 oder SplitFX bestimmt wird,
- eine Tabelle aller **Normalenvektoren der Kluftchar**
- und die **Orientierung** der zum P10-Wert zugehörigen **Scanline**.

Die noch fehlenden Parameter zur Ermittlung des P32 Wertes, der Fisher Mean Pole R und der Winkel zwischen diesem und der Scanline,  $\rho$ , werden - wie in Kapitel 5.3.2 beschrieben - berechnet.

### 11.3.4 Berechnung der einzelnen Abstände zwischen den Kluftflächen

Zur Ermittlung der Abstände zwischen den einzelnen Kluftflächen, muss der Abstand der Schnittpunkte berechnet werden, die die Bedingung  $r > d$  erfüllen. Da  $A_z \neq B_z$  (unterschiedliche z-Werte der Vektoren, die die Scanline beschreiben), können die Schnittpunkte nach ihrem z-Wert sortiert und so in die Reihenfolge ihres Auftretens entlang der Scanline gesetzt werden. Anschließend

wird die euklidische Distanz der benachbarten Vektoren der Schnittpunkte zueinander berechnet. Dieser entspricht dem jeweiligen Kluftabstand.

## 11.4 Anhang Größe

### 11.4.1 Schar NW-SE $h_{\max}$

Tabelle 11.1 Ergebnisse der statistischen Tests nach Kolmogorow-Smirnow (KS-Test) für  $h_{\max}$  der Schar NW-SE. Jede Verteilung wurde 2500-mal getestet.

Verteilung	Erfolgreiche KS-Tests	Xmin	Alpha (scale)	Beta (shape)	Lambda	Sigma	Mu
Potenz	2478	2,1898	4,4436				
Exp	0	1,2296			1,4060		
Reg Exp	2293				1,4060		
Log	2	0,3697				0,3881	0,3745
Reg Log	2032					1,2968	-0,1043
Gamma	2256		1,0939	1,5381			
Poisson	2500				1,4060		
Weibull	253		1,0939	1,5381			

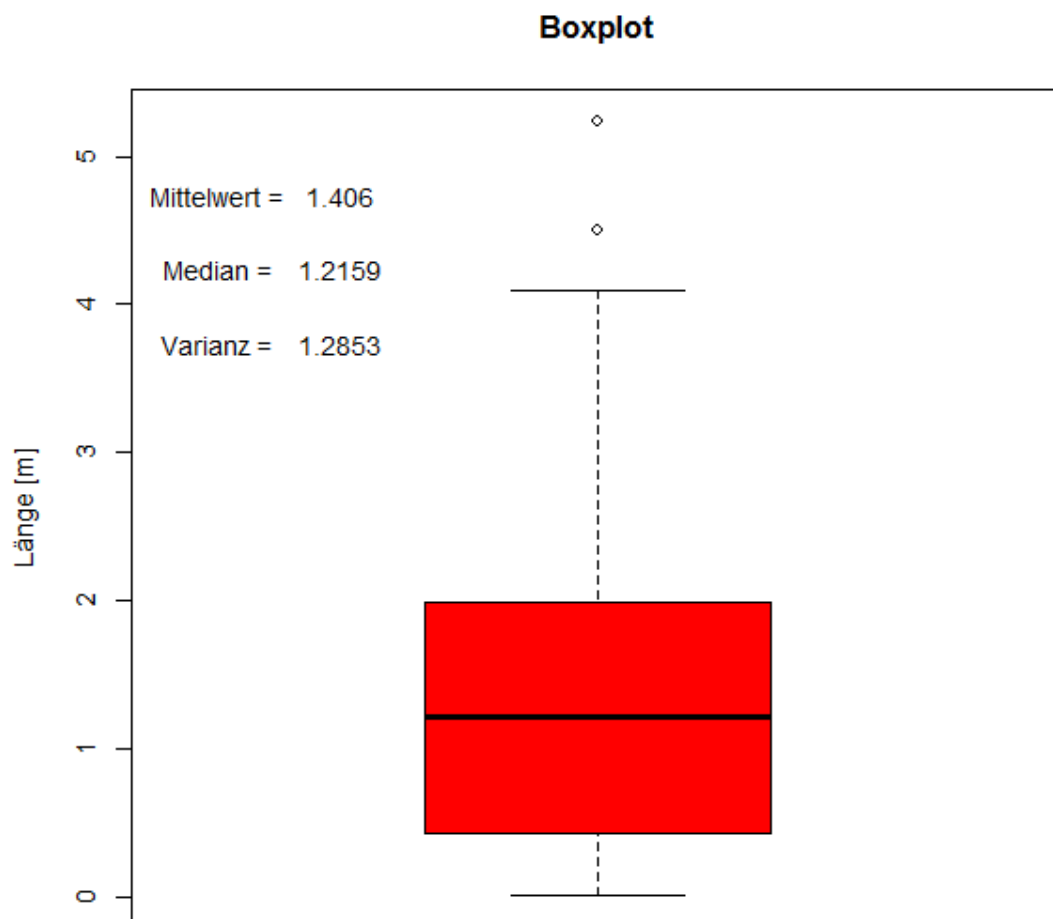


Abbildung 11.1 Zusammenfassender Boxplot der NW-SE Kluftschar des Steinbruchs Rockenau ( $h_{\max}$ ).

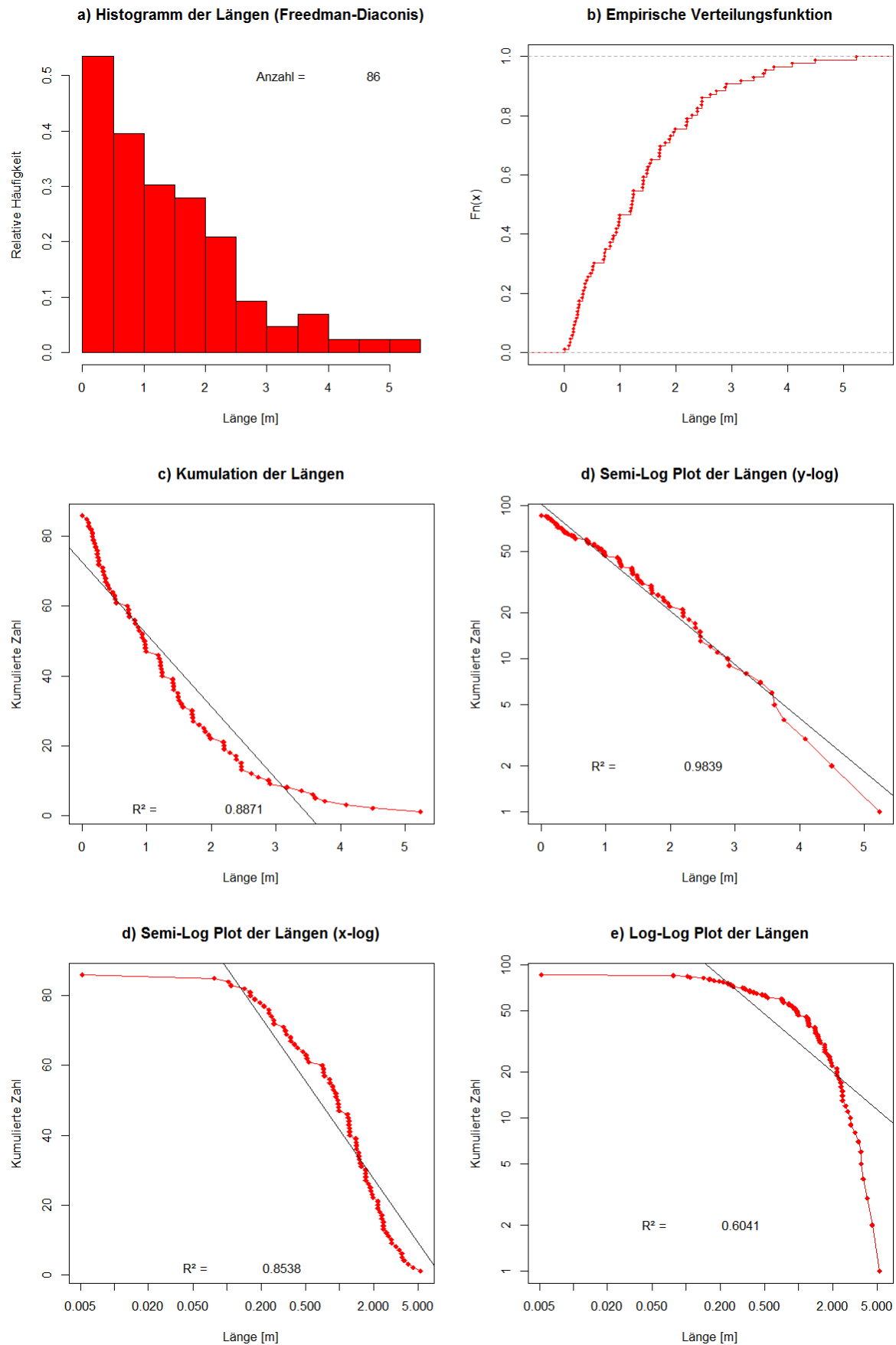
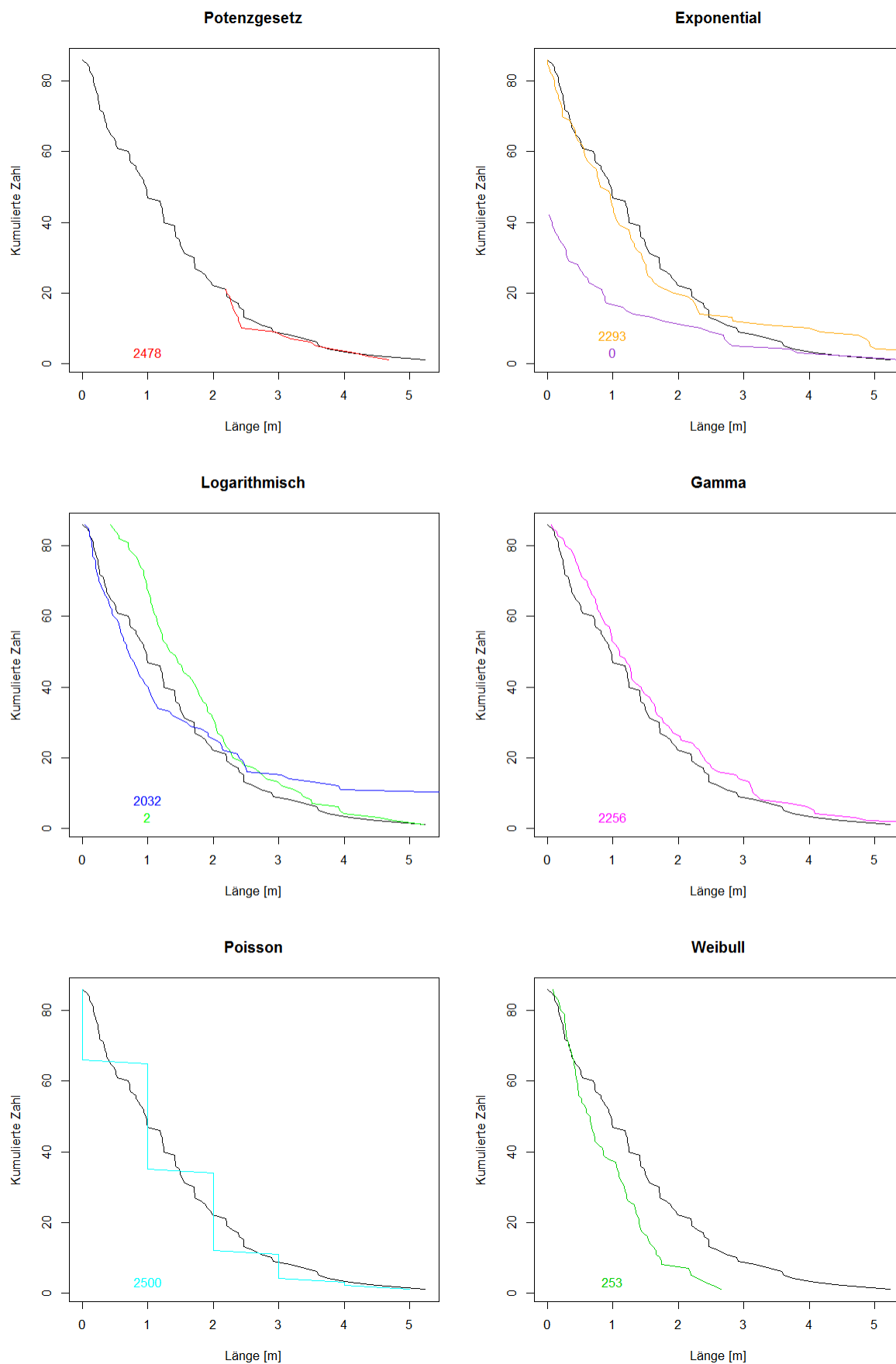


Abbildung 11.2 Statistik des Parameters  $h_{\max}$  der Kluftchar NW-SE.



Abbildung 11.3 Ergebnisse des Kolmogorow-Smirnow Tests der Flächendaten der Kluftchar NW-SE ( $h_{\max}$ ).

### 11.4.2 Schar NW-SE $I_{\max}$

Tabelle 11.2 Ergebnisse der statistischen Tests nach Kolmogorow-Smirnow (KS-Test) für  $I_{\max}$  der Schar NW-SE. Jede Verteilung wurde 2500-mal getestet.

Verteilung	Erfolgreiche KS-Tests	Xmin	Alpha (scale)	Beta (shape)	Lambda	Sigma	Mu
<b>Potenz</b>	2462	2,0428	3,2926				
<b>Exp</b>	0	0,836			2,24		
<b>Reg Exp</b>	4				2,24		
<b>Log</b>	2378	0,8360				0,2997	0,6063
<b>Reg Log</b>	2380					0,2997	0,6063
<b>Gamma</b>	0		0,4654	1,0426			
<b>Poisson</b>	0				2,24		
<b>Weibull</b>	0		0,4654	1,0426			

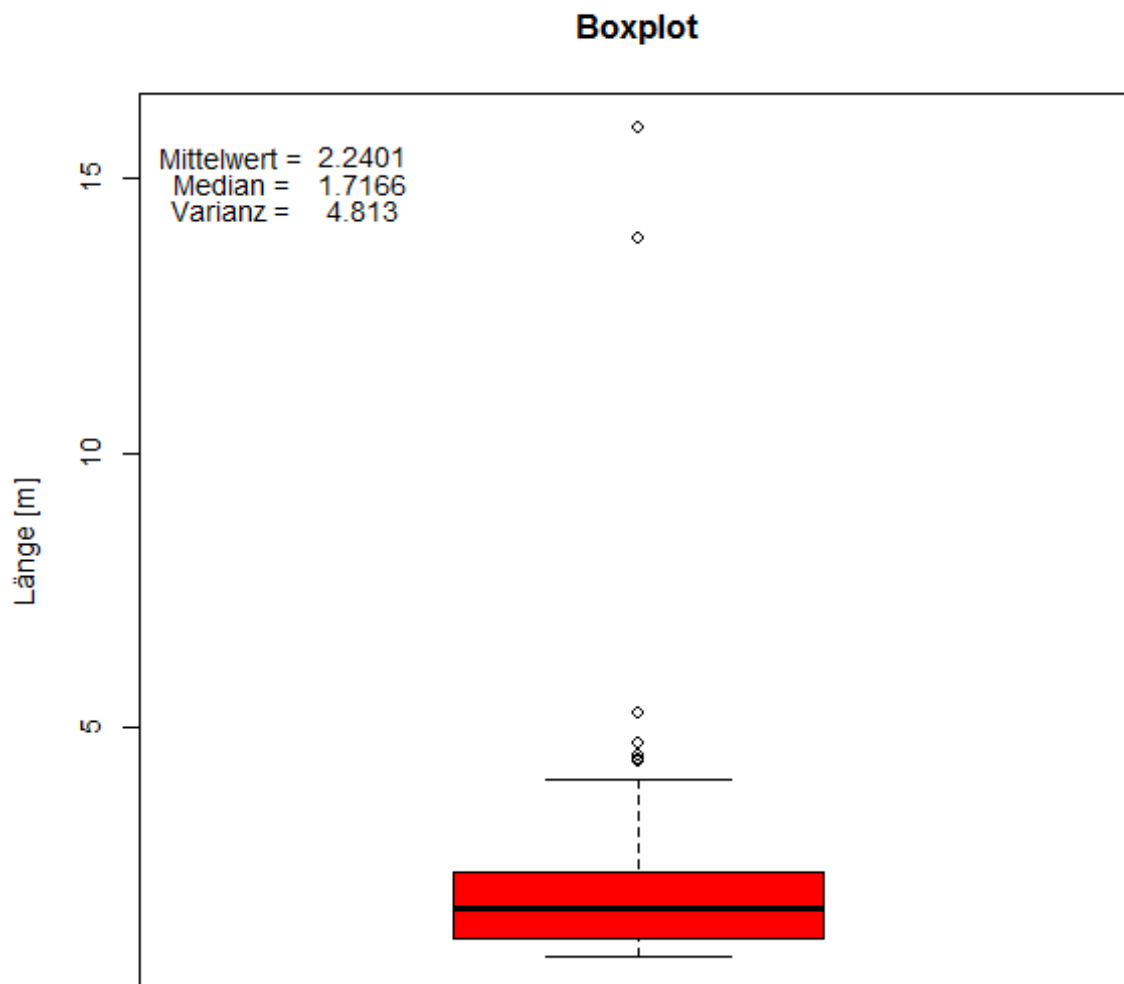
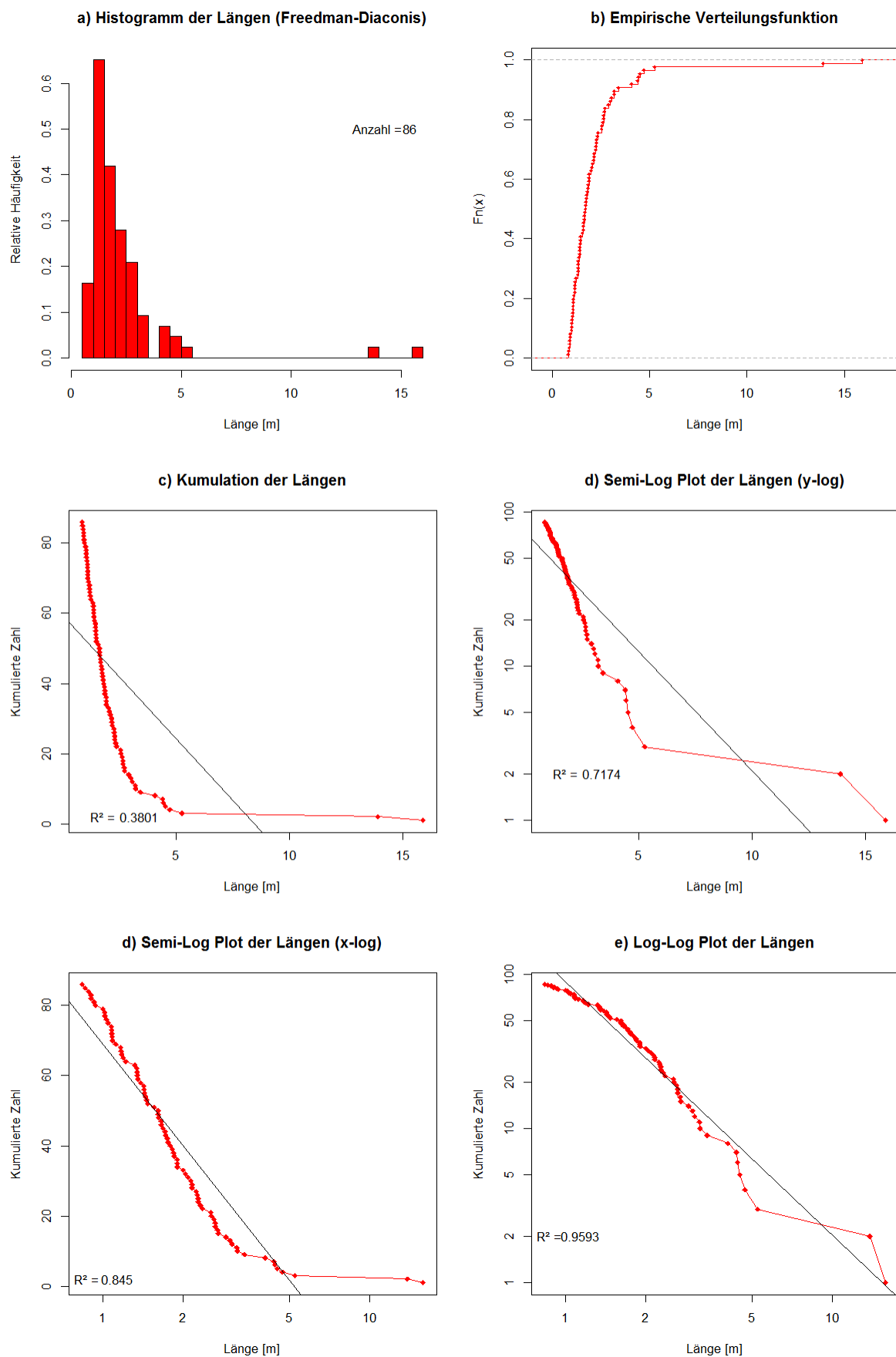


Abbildung 11.4 Zusammenfassender Boxplot der NW-SE Kluftschar des Steinbruchs Rockenau ( $I_{\max}$ ).

Abbildung 11.5 Statistik des Parameters  $l_{\max}$  der Kluftchar NW-SE.

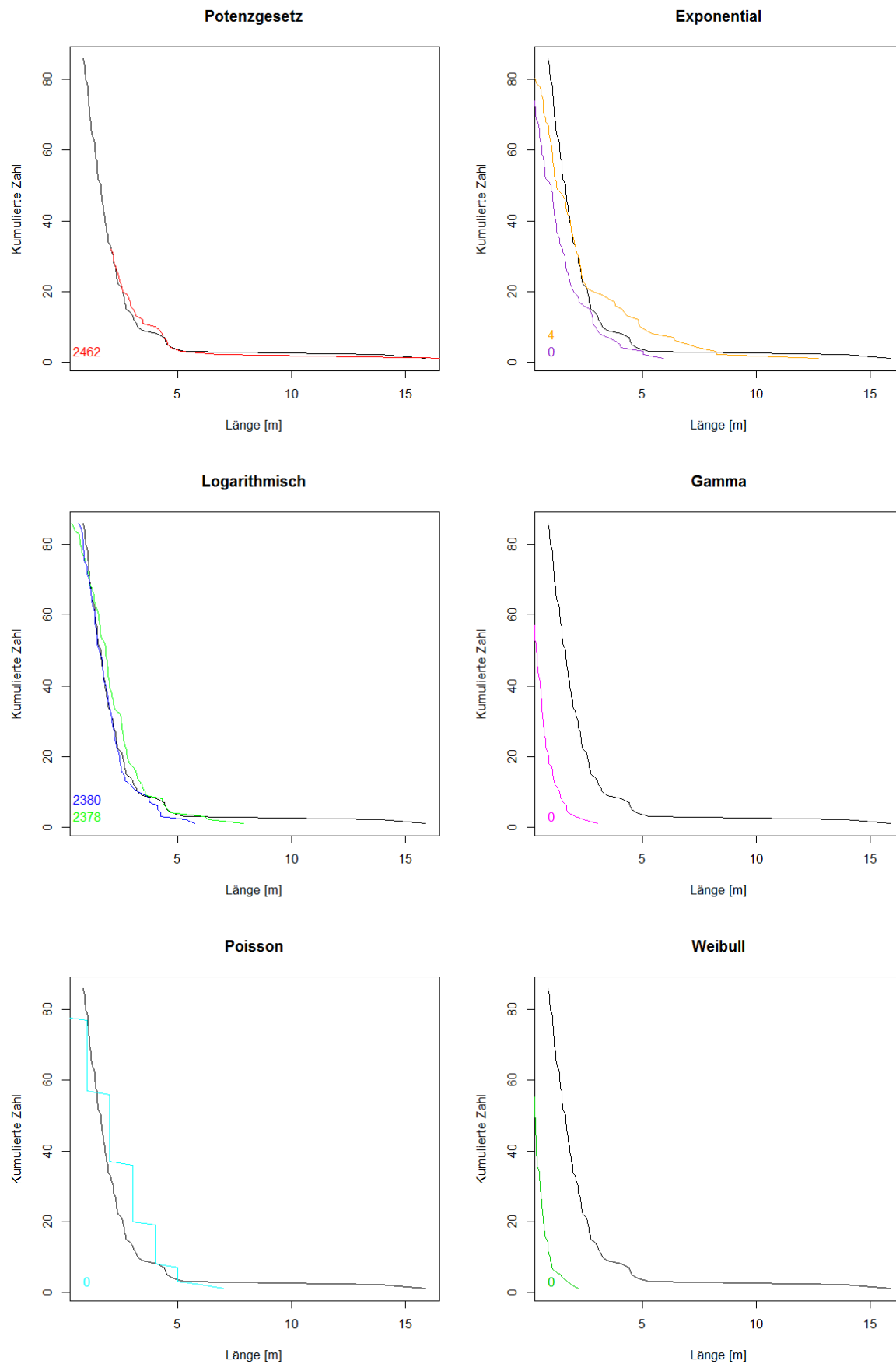


Abbildung 11.6 Ergebnisse des Kolmogorow-Smirnow Tests der Flächendaten der Kluftchar NW-SE ( $l_{\max}$ ).

### 11.4.3 Schar WNW-ESE $h_{\max}$

Tabelle 11.3 Ergebnisse der statistischen Tests nach Kolmogorow-Smirnow (KS-Test) für  $h_{\max}$  der Schar WNW-ESE. Jede Verteilung wurde 2500-mal getestet.

Verteilung	Erfolgreiche KS-Tests	Xmin	Alpha (scale)	Beta (shape)	Lambda	Sigma	Mu
Potenz	2433	1,8656	3,1967				
Exp	0	0,9338			2,0757		
Reg Exp	32				2,0757		
Log	2445	0,244				0,4409	0,5372
Reg Log	2141					0,6422	0,4729
Gamma	971		0,9198	1,9091			
Poisson	0				2,0757		
Weibull	0		0,9198	1,9091			

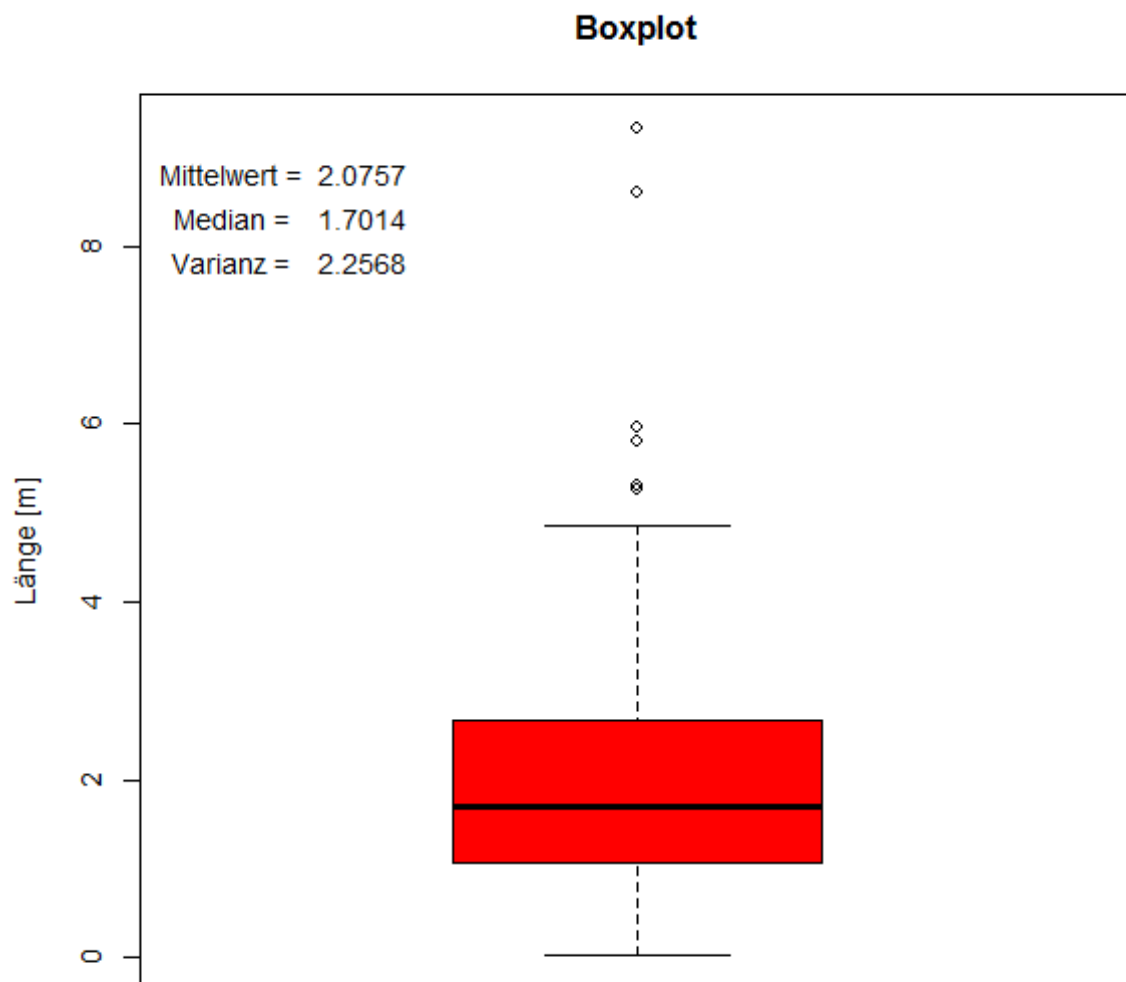


Abbildung 11.7 Zusammenfassender Boxplot der WNW-ESE Kluftschar des Steinbruchs Rockenau ( $h_{\max}$ ).

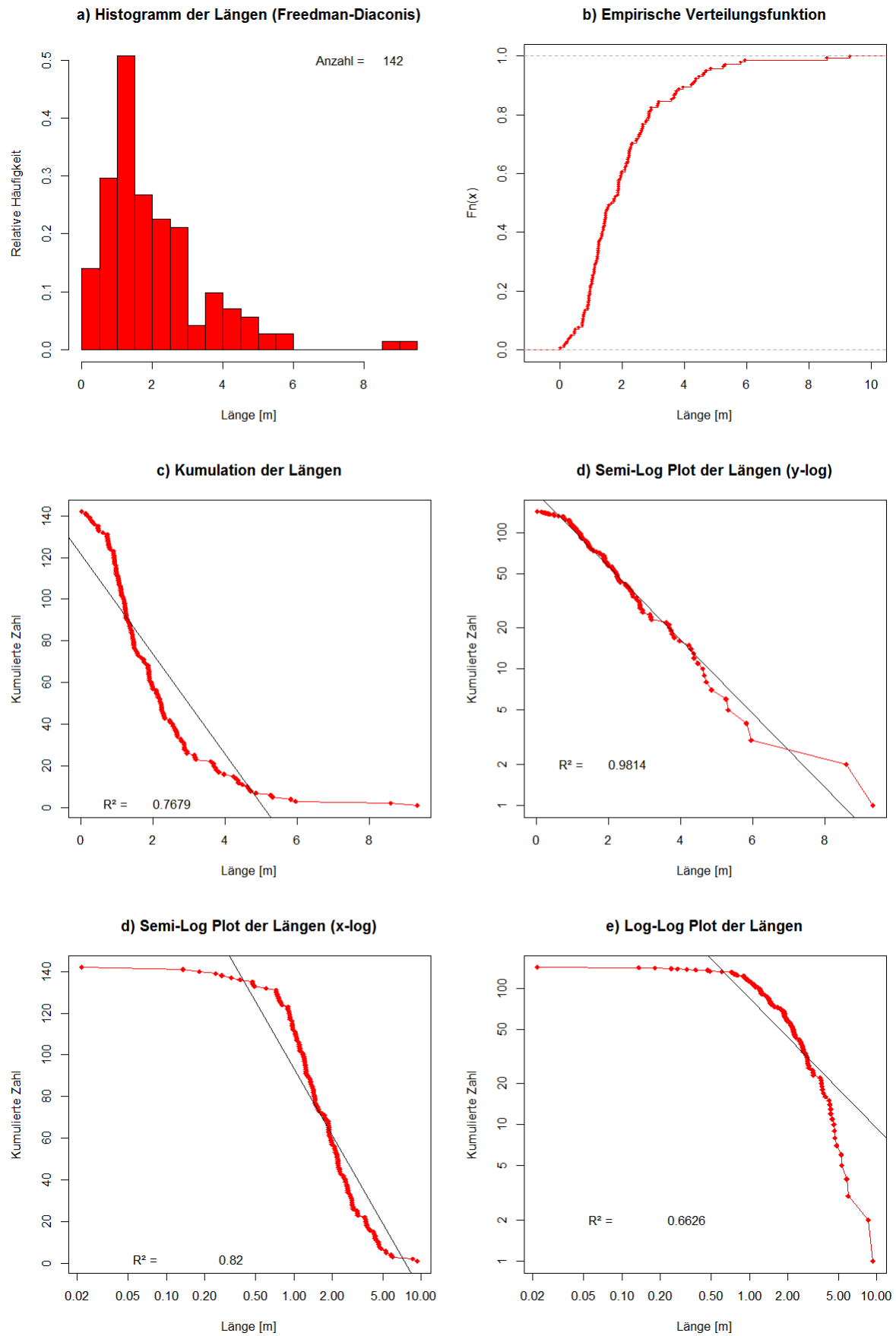
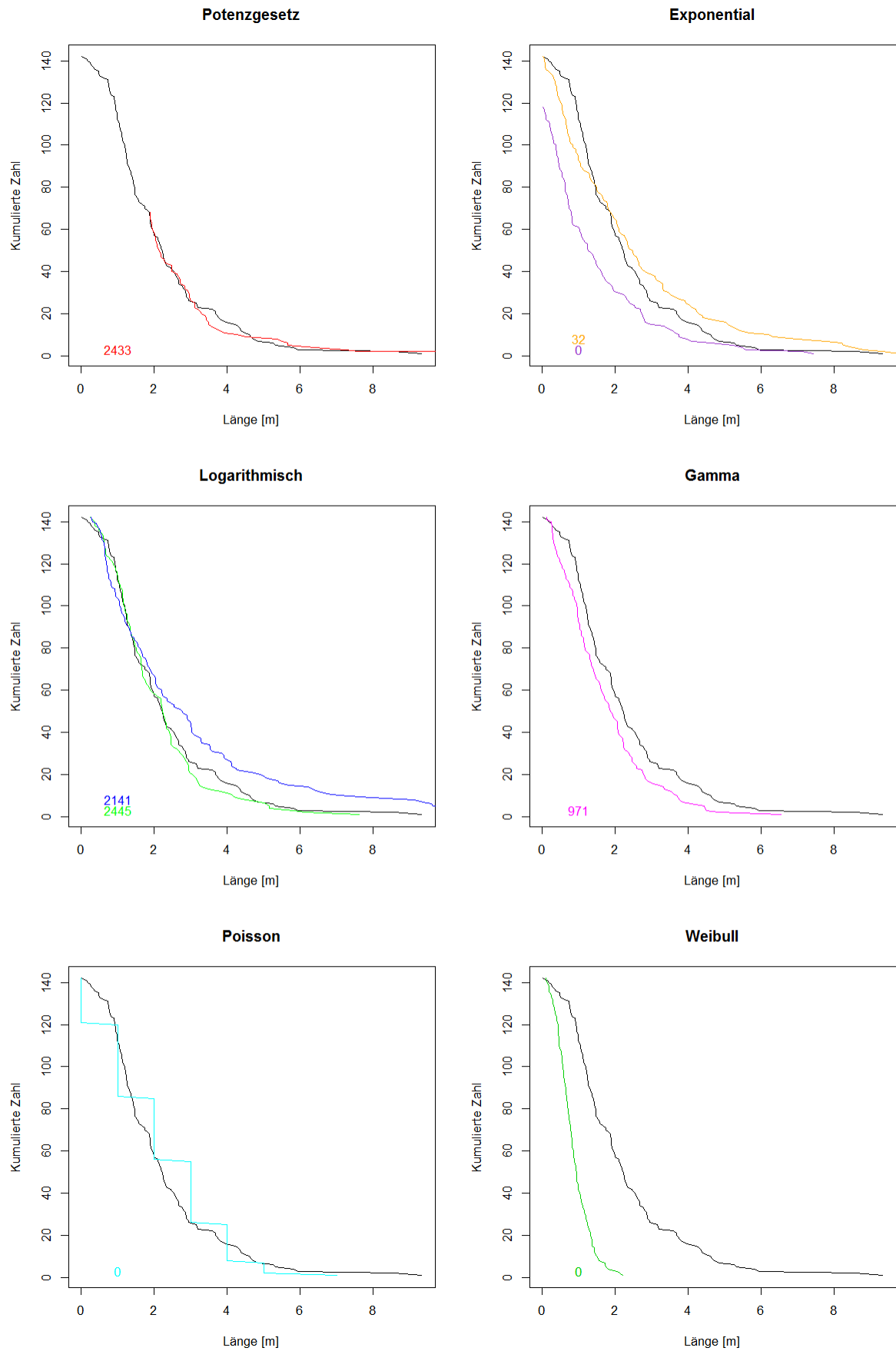


Abbildung 11.8 Statistik des Parameters  $h_{\max}$  der Kluftchar WNW-ESE.



Abbildung 11.9 Ergebnisse des Kolmogorow-Smirnow Tests der Flächendaten der Kluftchar WNW-ESE ( $h_{\max}$ ).

#### 11.4.4 Schar WNW-ESE $I_{\max}$

Tabelle 11.4 Ergebnisse der statistischen Tests nach Kolmogorow-Smirnow (KS-Test) für  $I_{\max}$  der Schar WNW-ESE. Jede Verteilung wurde 2500 mal getestet.

Verteilung	Erfolgreiche KS-Tests	Xmin	Alpha (scale)	Beta (shape)	Lambda	Sigma	Mu
Potenz	2264	1,3935	2,5383				
Exp	0	4,0684			2,6157		
Reg Exp	0				2,6157		
Log	0	2,5516				0,1114	1,5074
Reg Log	1448					0,3298	0,7800
Gamma	1		2,1260	0,8128			
Poisson	0				2,6157		
Weibull	0		2,1260	0,8128			

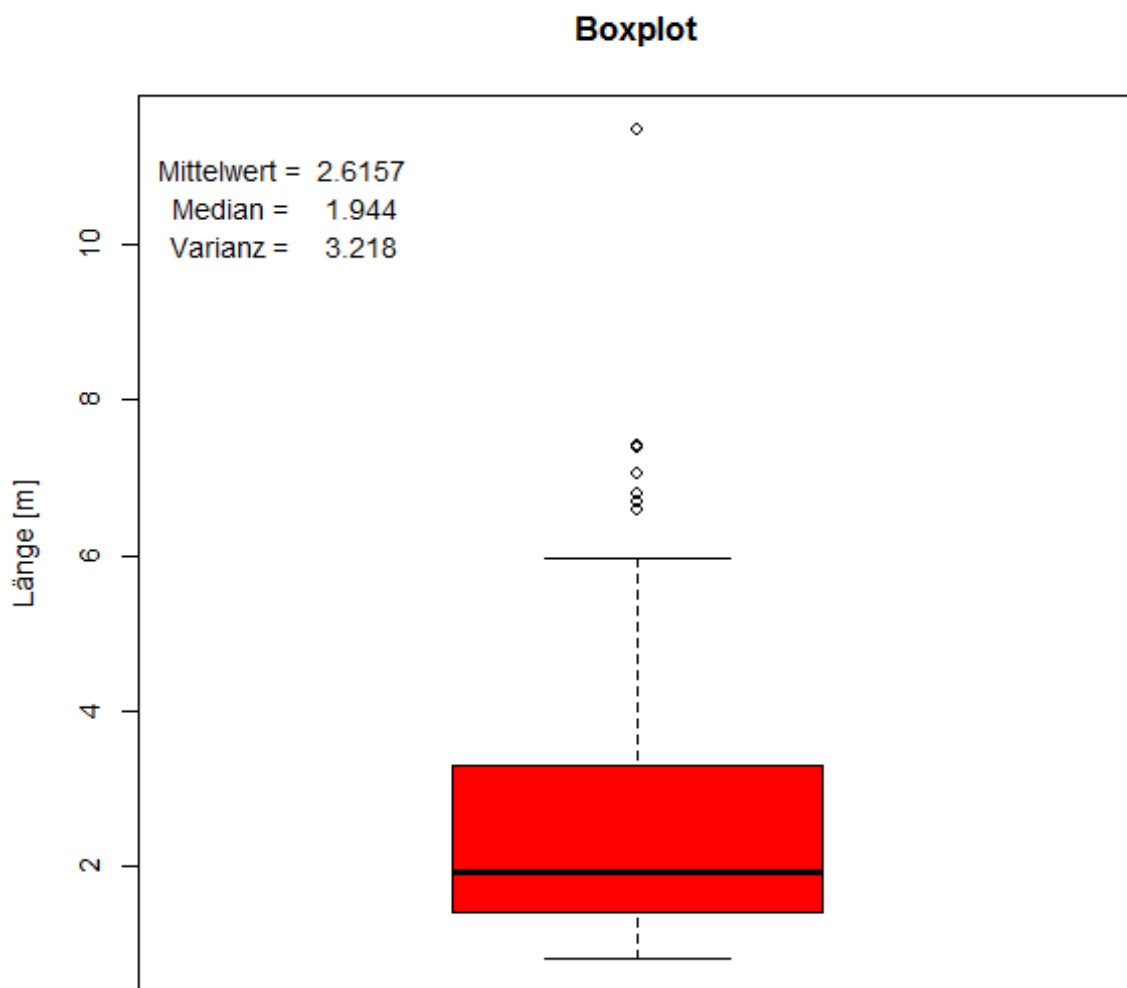


Abbildung 11.10 Zusammenfassender Boxplot der WNW-ESE Kluftschar des Steinbruchs Rockenau ( $I_{\max}$ ).

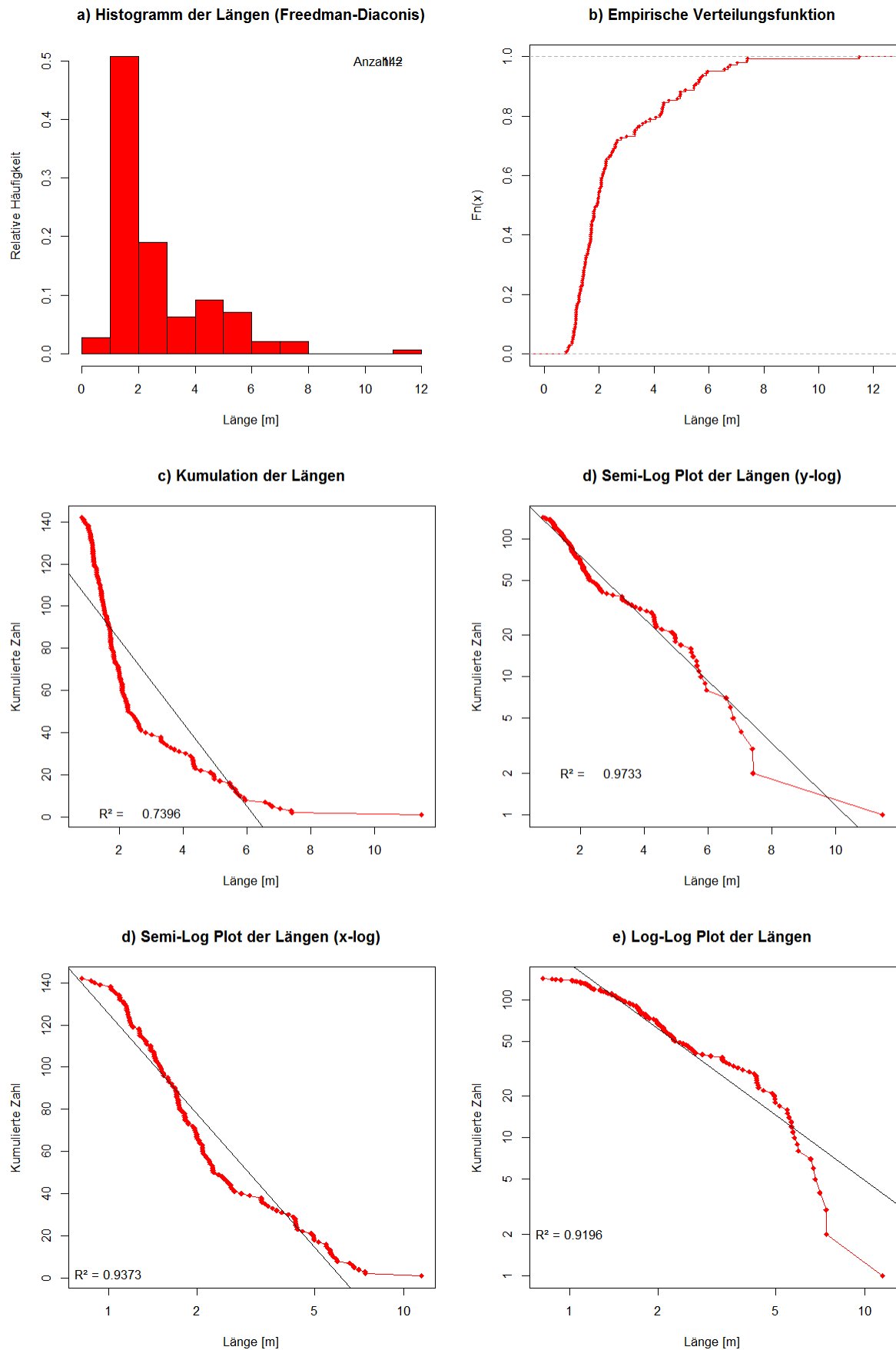


Abbildung 11.11 Statistik des Parameters  $l_{\max}$  der Kluftschar WNW-ESE.

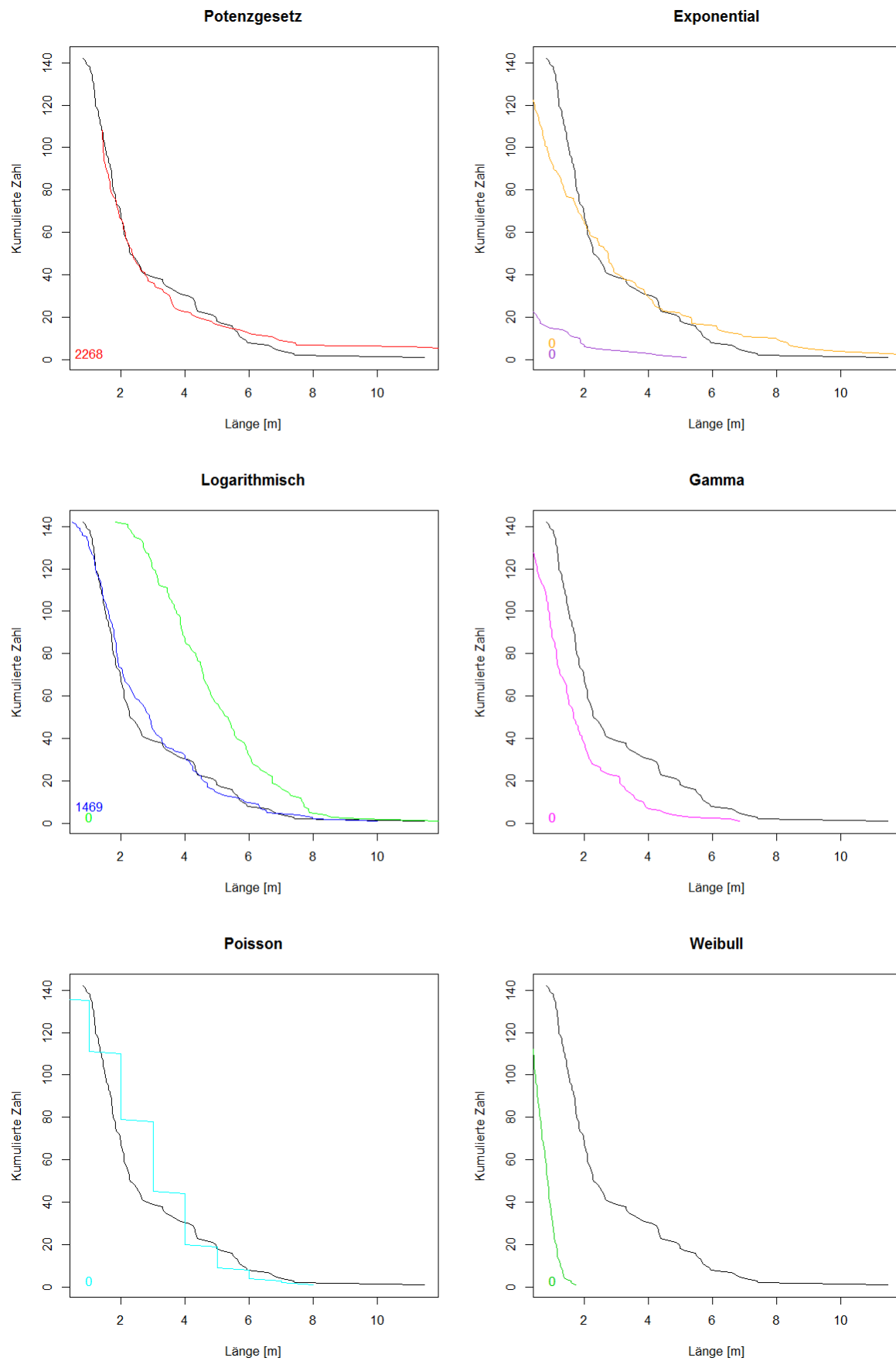


Abbildung 11.12 Ergebnisse des Kolmogorow-Smirnow Tests der Flächendaten der Kluftchar WNW-ESE ( $l_{\max}$ ).

## Arbeitsablauf SplitFX am Beispiel Rockenau:

- Import der Punktwolke als ASCII Datei (oder ein anderes kompatibles Dateiformat) in SplitFX.
- Aufteilen der Punktwolke in einzelne Bereiche, um so die Triangulation zu vereinfachen, da ein 2.5D TIN (Triangulated Irregular Network) erzeugt wird. Eine Unterteilung in einzelne Bereiche ist zwingend notwendig, da es sich nicht um eine „echte“ 3D-Triangulation handelt. Das Mesh enthält dann unzählige Fehler. Die Punktwolke wird dazu in einzelne, möglichst koplanare Bereiche unterteilt und die Triangulation für jeden Bereich einzeln durchgeführt.
- Einstellen der Parameter „minimum patch size“ und „maximum neighboring angle“. Diese sind den Gegebenheiten des gescannten Aufschlusses anzupassen. Anschließend erfolgt die Berechnung der Patches.
- Markieren der Patches nach deren Orientierung im Stereonetz. Jedes Set einzeln anwählen und exportieren.
- Exportieren der Daten als „Formatted Vertices“. Dies exportiert alle Eckpunkte der Patches bzw. Polygone.
- Schritte für alle Teilbereiche wiederholen.
- Zusammenfügen der txt-Dateien der Teilbereiche gemäß der Orientierung.
- Im Notepad++ alle Kommas durch Tabs ersetzen und Header entfernen.
- Import in R zur Auswertung der Maximallänge (Skript: „lmax.R“ und „hmax.R“).
- Berechnung der euklidischen Distanzen der Eckpunkte aller Polygone und Bestimmung von  $h_{\max}$  und  $l_{\max}$ .
- Ausgabe der Ergebnisse im ASCII-Format. Die Ausgabe der Werte folgt der Reihenfolge der Eingabedaten. Jeder Längenwert kann durch Zusammenführen der Daten so eindeutig einer Trennfläche zugeordnet werden.
- In R werden die Daten statistisch ausgewertet:
  - Histogrammauswertung nach Freedman-Diaconis.
  - Kumulierte Auftragung aller Längenwerte in einem normalen Plot, Semi-Log Plot und Log-Log Plot inklusive der Trendlinien. Auf diese Weise kann eine erste visuelle Überprüfung des Trends der Verteilung erfolgen. In die Plots werden Trendlinien eingebaut. Korrelieren die Daten gut mit der Trendlinie, können folgende Schlussfolgerungen getroffen werden: In einem normalen Plot wird ein rein linearer Trend der Daten, im Semi-Log Plot ein exponentieller Trend und im Log-Log Plot ein dem Potenzgesetz folgender Trend dargestellt. Zusätzlich wird das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  angegeben. Je näher dieses an 1 liegt, desto besser korrelieren die Daten.
  - Eine empirische Verteilungsfunktion.
- Die Daten werden nun auf die ihnen zugrunde liegende Funktion mithilfe des Kolmogorow-Smirnow Tests getestet. Die Verteilung der Daten wird auf das ein Potenzgesetz, die exponentielle (mit und ohne  $x_{\min}$ ), logarithmische (mit und ohne  $x_{\min}$ ), Gamma-, Poisson- und Weibull-Verteilung hin untersucht (siehe Tabelle 5.4).
- Die am besten passende Wahrscheinlichkeitsverteilung wird gewählt und ihre Parameter als Eingabedaten für ein Discrete Fracture Network Model genutzt.

### 11.4.5 Zusätzliche Statistik der Flächen der Schar NE-SW

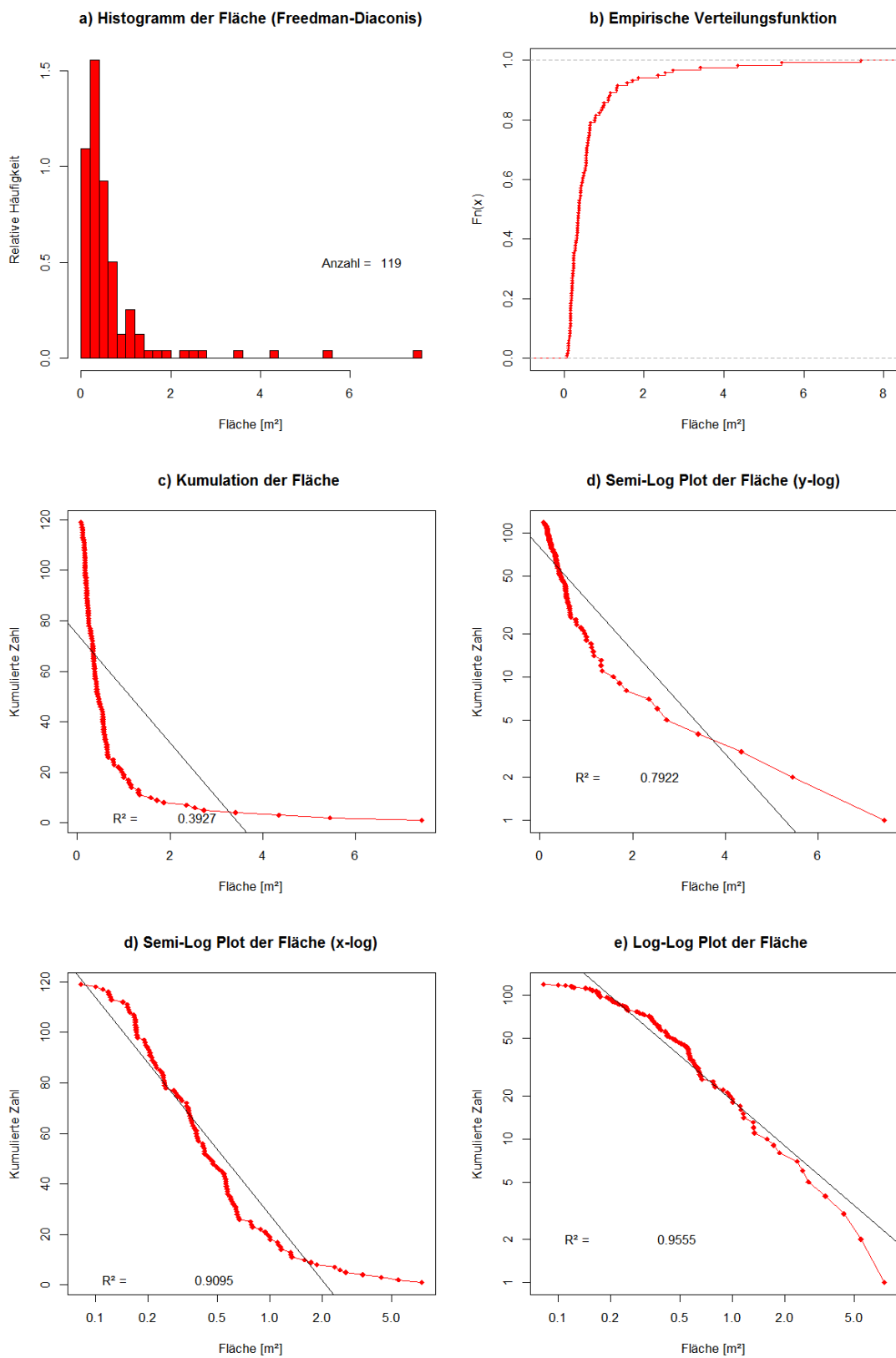


Abbildung 11.13 Statistik der Flächengrößen der Kluftchar NE-SW. Sie zeigt ähnliche Trends wie die Parameter  $h_{\max}$  und  $l_{\max}$ .



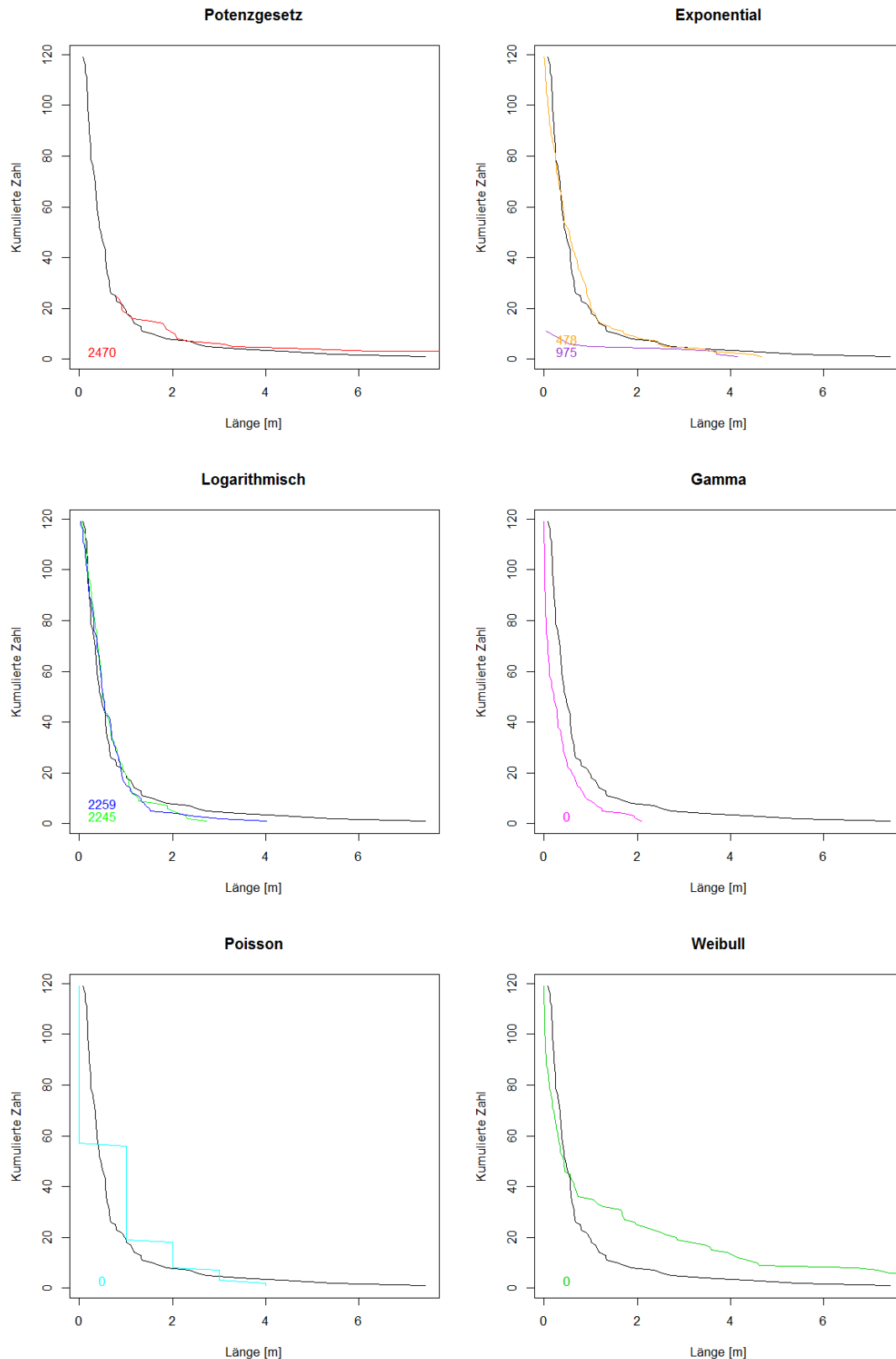


Abbildung 11.14 Ergebnisse des Kolmogorow-Smirnow Tests der Flächendaten der Kluftchar NE-SW. Aufgezeigt ist die Verteilung der gemessenen Daten (schwarz). Die logarithmische Normalverteilung und das ein Potenzgesetz weisen eine hohe Anzahl erfolgreicher Tests auf. Die logarithmische Verteilung ohne Schwellenwert  $x_{\min}$  ist die hier favorisierte Dichtefunktion (blau).

## 11.4.6 Kumulative Verteilungsfunktionen der 3 Kluftscharen Kluftchar NE-SW

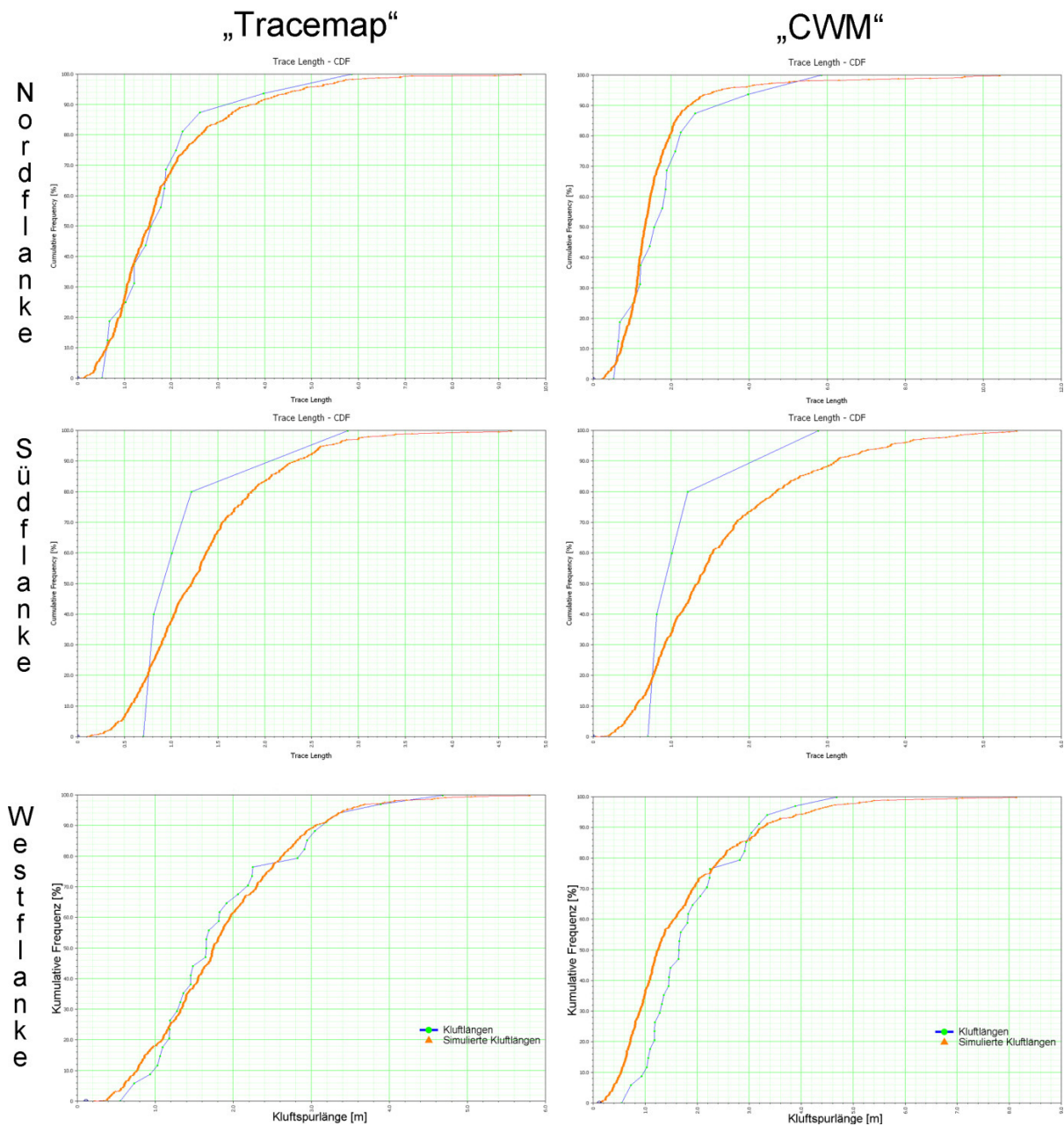


Abbildung 11.15 Simulierte Kluftlängen (orange) aus der Kluftspuranalyse mit Fracman an allen 3 Flanken des Aufschlusses (NE-SW). Nicht korrigierte Werte („Tracemap“) und korrigierte Werte (CWM = Circular Window Mapping).

# Kluftchar NW-SE

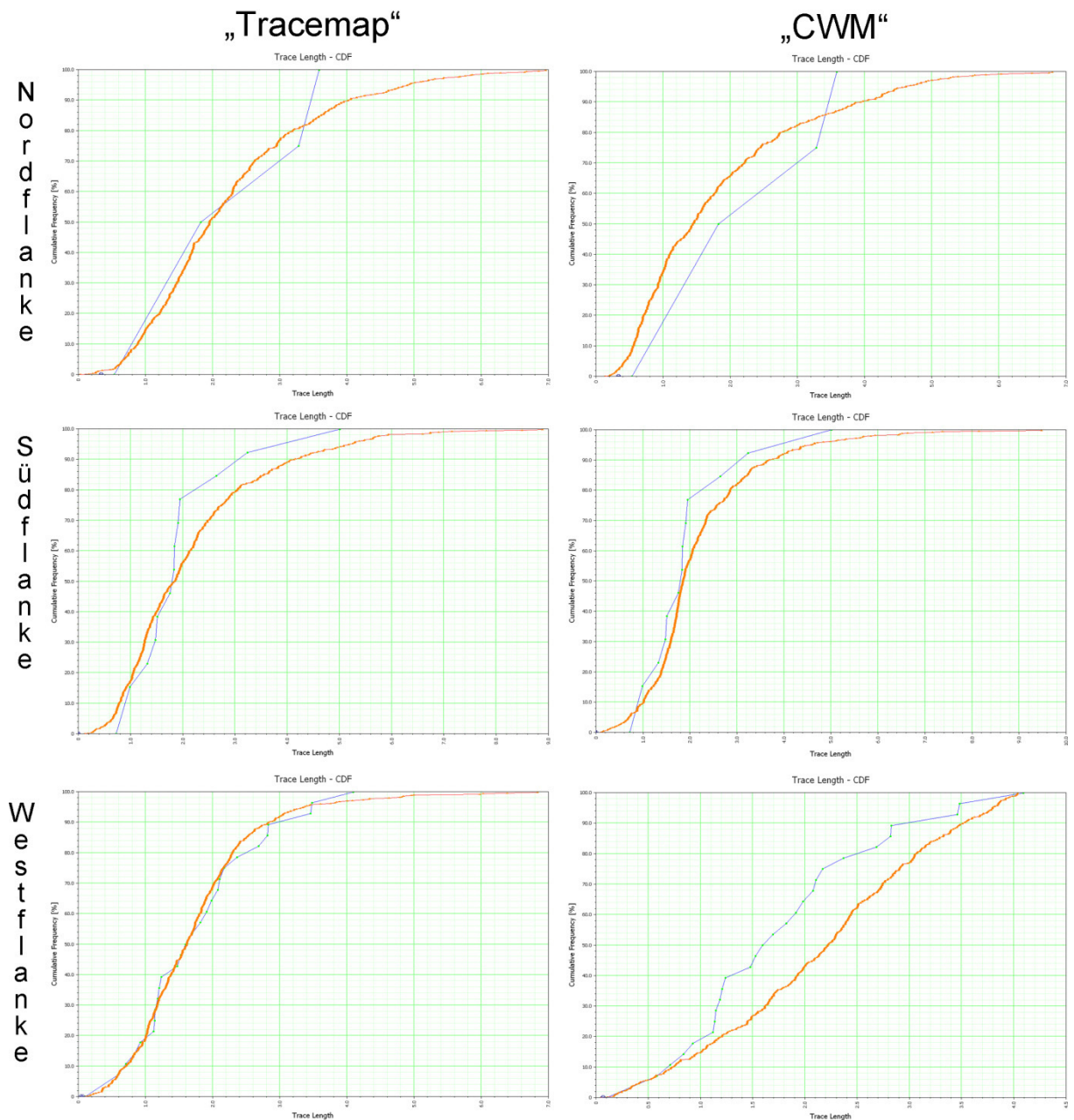


Abbildung 11.16 Simulierte Kluftlängen (orange) aus der Kluftspuranalyse mit Fracman an allen 3 Flanken des Aufschlusses (NW-SE). Nicht korrigierte Werte („Tracemap“) und korrigierte Werte (CWM = Circular Window Mapping).



# Kluftschar WNW-ESE

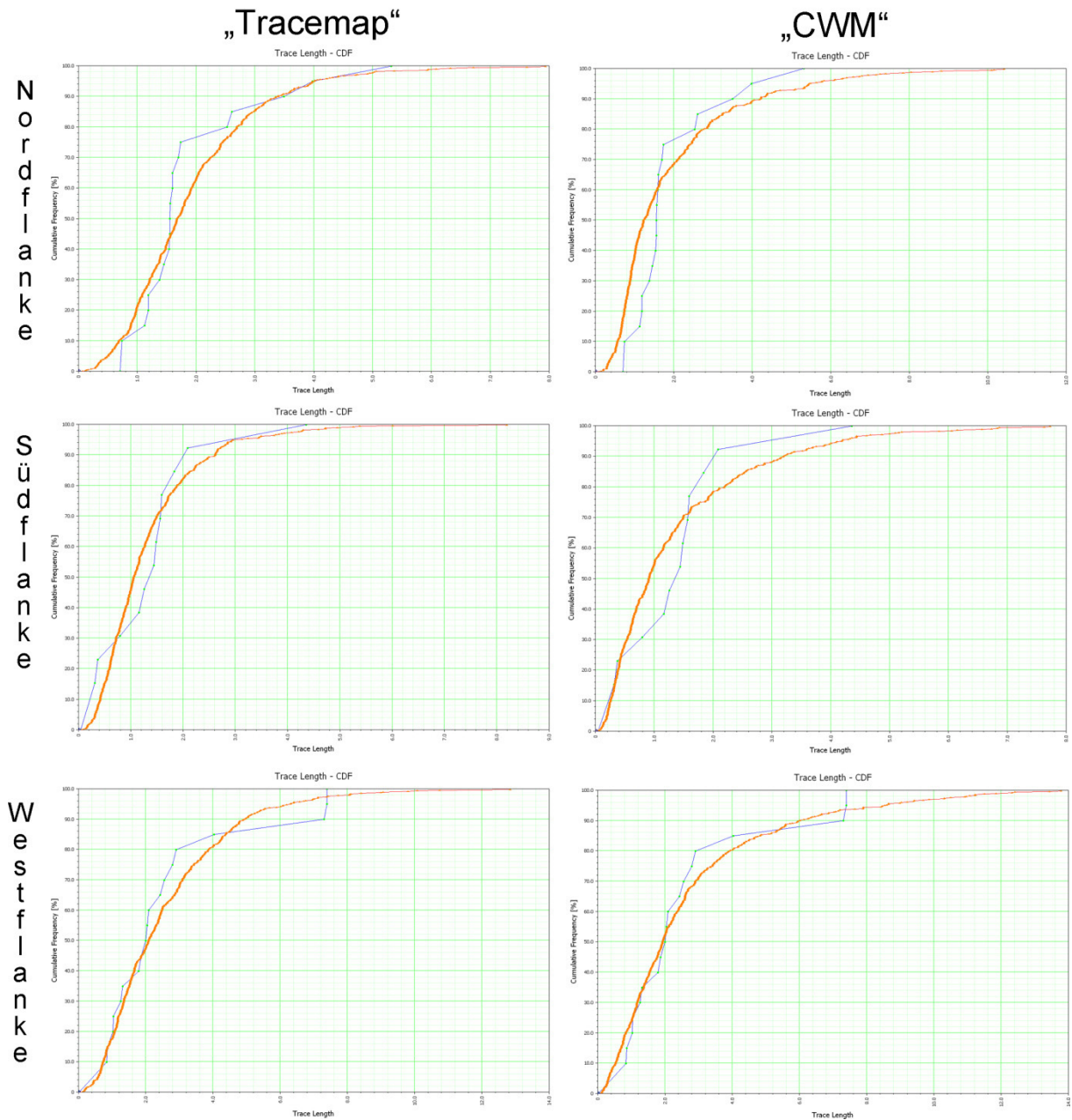


Abbildung 11.17 Simulierte Kluftlängen (orange) aus der Kluftspuranalyse mit Fracman an allen 3 Flanken des Aufschlusses (WNW-ESE). Nicht korrigierte Werte („Tracemap“) und korrigierte Werte (CWM = Circular Window Mapping).

Tabelle 11.5 Die detaillierten Ergebnisse der Auswertung der Kluftspurlängen mit Fracman.

Kluftschar	Durchschnittliche Kluftlänge	Standardabweichung	Mittlerer Radius	Radius Dev/Exponent	Simulierte Kluftlängen	Standardabw. Simulierter Kluftlängen	K-S Test	Signifikanzniveau	Verteilung	Anzahl
NE-SW Westflanke CWM	1.4174	2.8628	0.4465		1.6200	1.1237	0.2058	0.4226	Exponential	26
NE-SW Nordflanke CWM	1.6640	2.3508	0.5210		1.8438	1.3396	0.1250	0.9990	Exponential	15
NE-SW Südflanke CWM	2.0944	3.1092	0.4498	0.6304	1.5920	1.0326	0.4000	0.6974	Log Normal	5
Mittelwerte	1.7253	2.7743	0.4724		1.6853	1.1653	0.2436	0.7063		
NE-SW Westflanke	1.9157	0.9485	0.6098		2.0447	1.4231	0.1176	0.9624	Exponential	34
NE-SW Nordflanke	1.9162	1.3564	0.6099		1.8571	1.3513	0.1250	0.9990	Exponential	16
NE-SW Südflanke	1.3261	0.8932	0.6276	0.3687	1.3313	0.7101	0.4000	0.6974	Log Normal	5
Mittelwerte	1.7193	1.0661	0.6158	0.3687	1.7444	1.1615	0.2142	0.8863		

WNW-ESE Westflanke CWM	3.4472	4.1234	1.0973		3.1364	2.3253	0.2500	0.4973	Exponential	12
WNW-ESE Nordflanke CWM	2.6927	4.5301	0.8571		2.6432	2.0149	0.3500	0.1349	Exponential	15
WNW-ESE Südflanke CWM	3.4557	4.5169	1.1000		3.4380	2.5581	0.5384	0.0280	Exponential	13
Mittelwerte	3.1985	4.3901	1.0181		3.0725	2.2994	0.3795	0.2201		
WNW-ESE Westflanke	2.6529	2.2178	0.8444		2.4815	1.9407	0.1500	0.9655	Exponential	20
WNW-ESE Nordflanke	1.9299	1.1472	0.6143		2.1464	1.5821	0.2500	0.4973	Exponential	20
WNW-ESE Südflanke	1.4114	1.0798	0.4493		1.3393	1.0359	0.1538	0.9950	Exponential	13
Mittelwerte	1.9981	1.4816	0.6360		1.9891	1.5196	0.1846	0.8193		

NW-SE Westflanke CWM	1.9104	3.6269	0.6081		1.9028	1.3451	0.1428	0.9100	Exponential	20
NW-SE Nordflanke CWM	2.5133	4.1162	0.4696	0.7286	1.8234	1.3235	0.2500	0.9969	Log Normal	3
NW-SE Südflanke CWM	2.2439	4.0872	0.7142		2.2516	1.7312	0.2308	0.8281	Exponential	13
Mittelwerte	2.2225	3.9434	0.5973		1.9926	1.4666	0.2079	0.9117		
NW-SE Westflanke	1.7982	0.9472	0.5732		1.7879	1.3020	0.1428	0.9168	Exponential	28
NW-SE Nordflanke	2.3091	1.4099	1.1573	0.6016	2.2513	1.2862	0.2500	0.9969	Log Normal	4
NW-SE Südflanke	2.0192	1.1086	0.6427		1.8443	1.4446	0.1538	0.9949	Exponential	13
Mittelwerte	2.0422	1.1552	0.7911	0.6016	1.9612	1.3443	0.1822	0.9695		

## Anhang

**Tabelle 11.6 Die detaillierten Ergebnisse der Kluftspurlängenauswertung mit Fracman. Die Tabelle ist bereits um die Werte bereinigt, die aus weniger als 10 Flächen bei der Berechnung stammen.**

Kluftschar	Durschn. Kluftlänge	Standardabweichung	Mittlerer Radius	Radius Dev/Exponent	Simulierte Kluftlängen	Standardabw. Simulierter Kluftlängen	K-S Test	Signifikanzniveau	Verteilung	Anzahl
NE-SW Westflanke CWM	1.4174	2.8628	0.4465		1.6200	1.1237	0.2058	0.4226	Exponential	26
NE-SW Nordflanke CWM	1.6640	2.3508	0.5210		1.8438	1.3396	0.1250	0.9990	Exponential	15
Mittelwerte	1.5407	2.6068	0.4837		1.7319	1.2317	0.1654	0.7108		
NE-SW Westflanke	1.9157	0.9485	0.6098		2.0447	1.4231	0.1176	0.9624	Exponential	34
NE-SW Nordflanke	1.9162	1.3564	0.6099		1.8571	1.3513	0.1250	0.9990	Exponential	16
Mittelwerte	1.9160	1.1525	0.6099		1.9509	1.3872	0.1213	0.9807		
WNW-ESE Westflanke CWM	3.4472	4.1234	1.0973		3.1364	2.3253	0.2500	0.4973	Exponential	12
WNW-ESE Nordflanke CWM	2.6927	4.5301	0.8571		2.6432	2.0149	0.3500	0.1349	Exponential	15
WNW-ESE Südflanke CWM	3.4557	4.5169	1.1000		3.4380	2.5581	0.5384	0.0280	Exponential	13
Mittelwerte	3.1985	4.3901	1.0181		3.0725	2.2994	0.3795	0.2201		
WNW-ESE Westflanke	2.6529	2.2178	0.8444		2.4815	1.9407	0.1500	0.9655	Exponential	20
WNW-ESE Nordflanke	1.9299	1.1472	0.6143		2.1464	1.5821	0.2500	0.4973	Exponential	20
WNW-ESE Südflanke	1.4114	1.0798	0.4493		1.3393	1.0359	0.1538	0.9950	Exponential	13
Mittelwerte	1.9981	1.4816	0.6360		1.9891	1.5196	0.1846	0.8193		
NW-SE Westflanke CWM	1.9104	3.6269	0.6081		1.9028	1.3451	0.1428	0.9100	Exponential	20
NW-SE Südflanke CWM	2.2439	4.0872	0.7142		2.2516	1.7312	0.2308	0.8281	Exponential	13
Mittelwerte	2.0772	3.8571	0.6612		2.0772	1.5382	0.1868	0.8691		
NW-SE Westflanke	1.7982	0.9472	0.5732		1.7879	1.3020	0.1428	0.9168	Exponential	28
NW-SE Südflanke	2.0192	1.1086	0.6427		1.8443	1.4446	0.1538	0.9949	Exponential	13
Mittelwerte	1.9087	1.0279	0.6080		1.8161	1.3733	0.1483	0.9559		





## 11.5 Anhang DFN Modelle

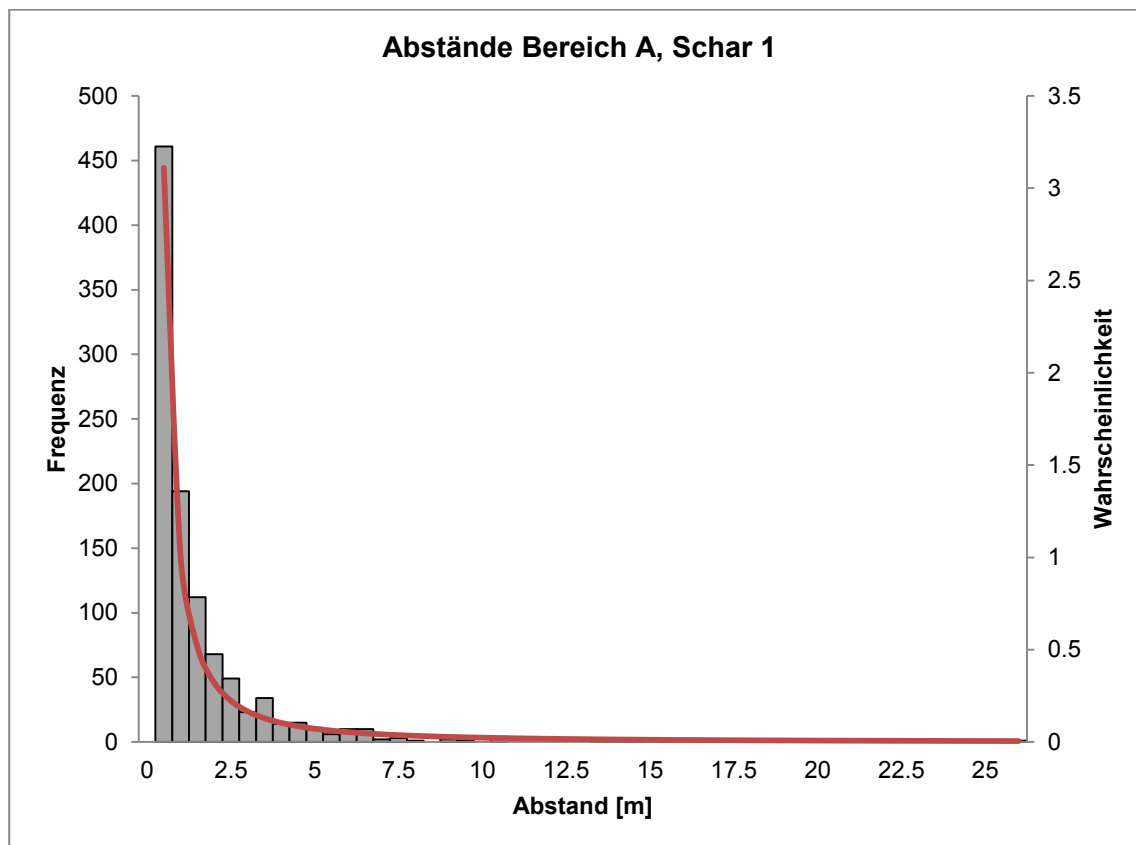


Abbildung 11.18 Histogramm der Abstände im Bereich A (Steinbruch Eberstadt) der Kluftschar 1.

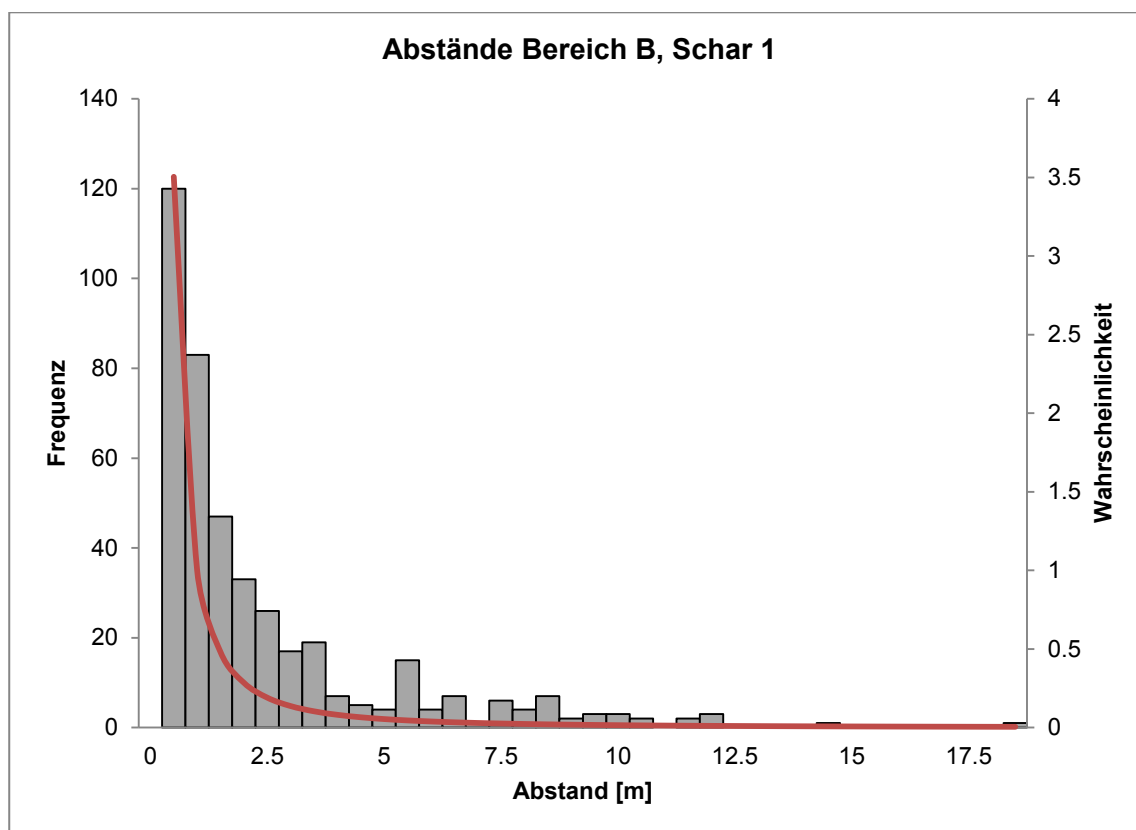


Abbildung 11.19 Histogramm der Abstände im Bereich B (Steinbruch Eberstadt) der Kluftschar 1.

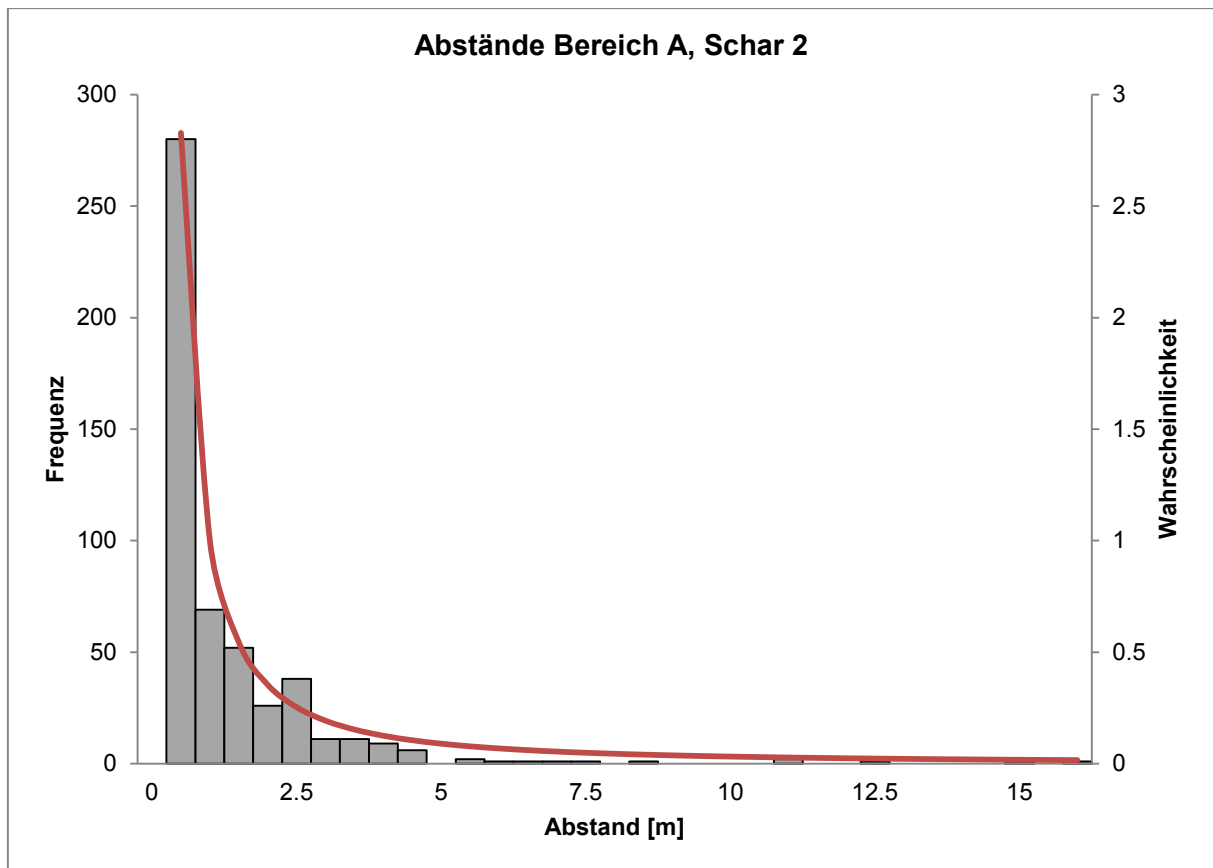


Abbildung 11.20 Histogramm der Abstände im Bereich A (Steinbruch Eberstadt) der Kluftschar 2.

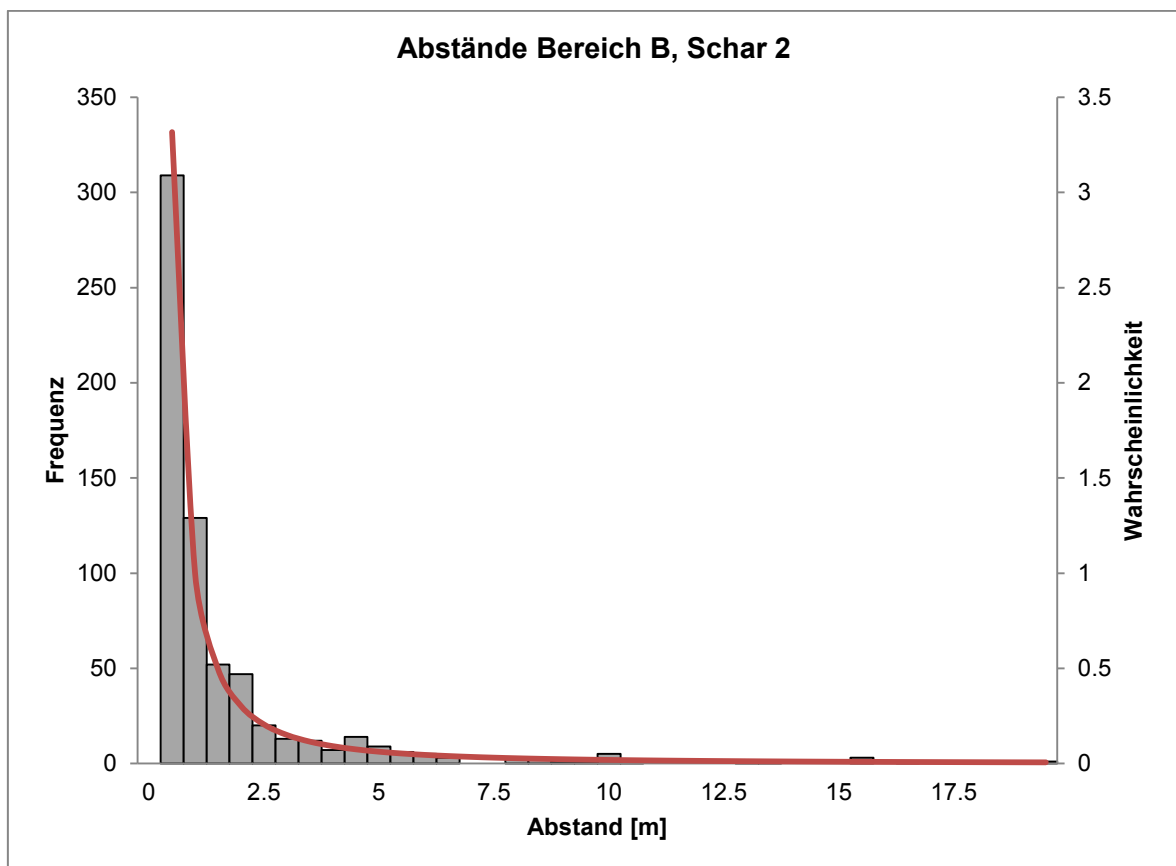


Abbildung 11.21 Histogramm der Abstände im Bereich B (Steinbruch Eberstadt) der Kluftschar 2.

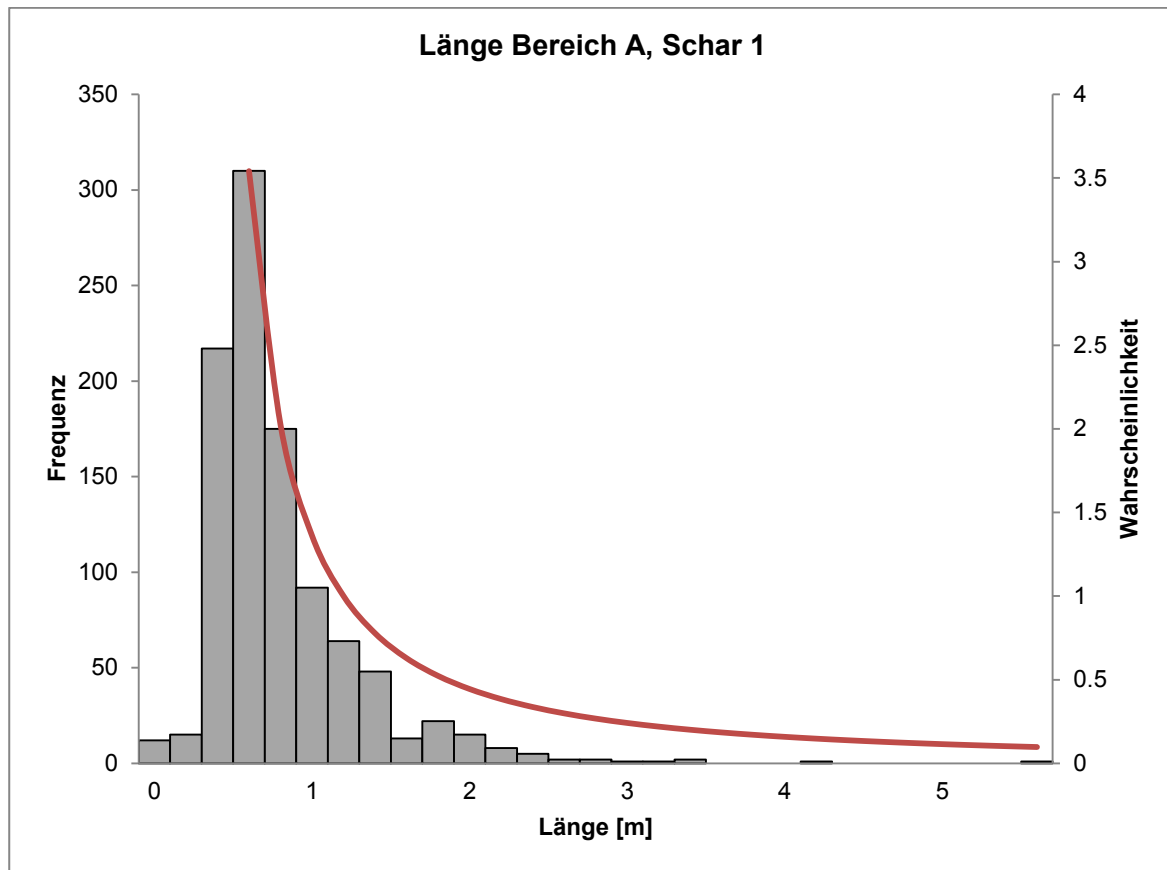


Abbildung 11.22 Histogramm der Längen im Bereich A (Steinbruch Eberstadt) der Kluftschar 1.

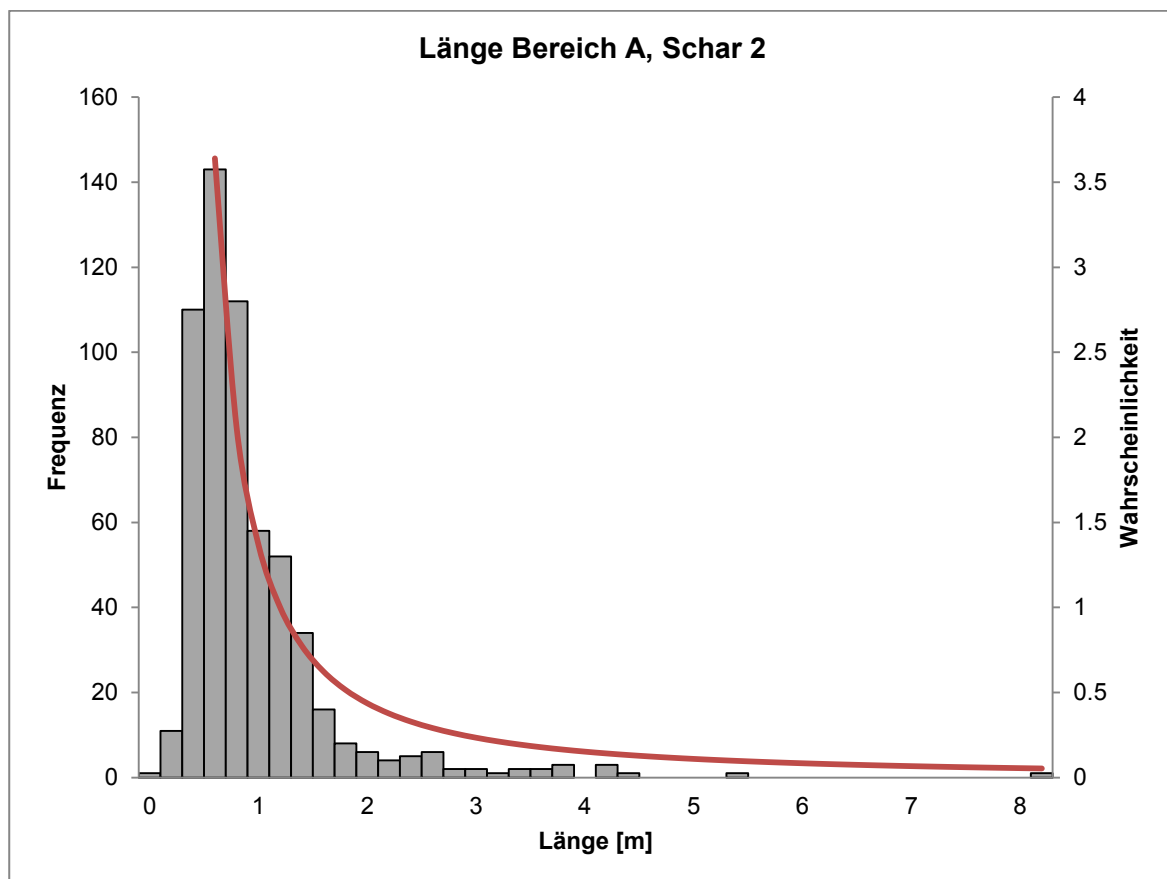


Abbildung 11.23 Histogramm der Längen im Bereich A (Steinbruch Eberstadt) der Kluftschar 2.

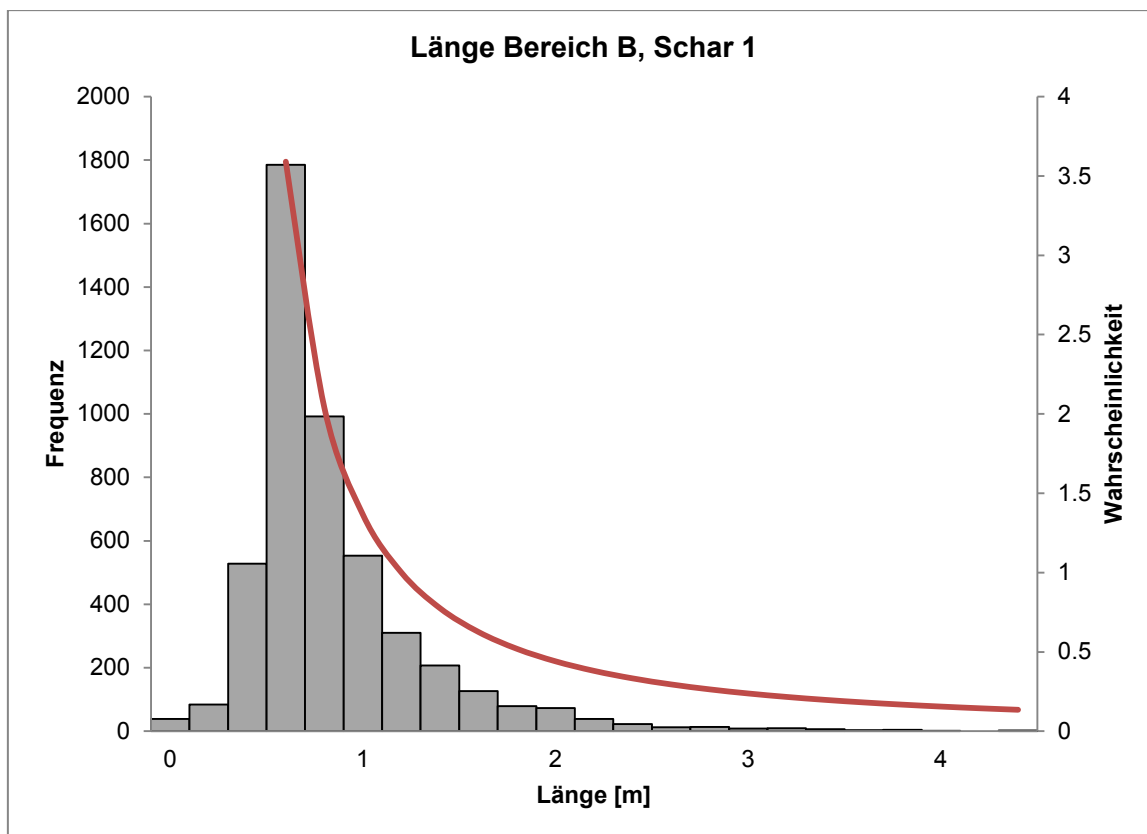


Abbildung 11.24 Histogramm der Längen im Bereich B (Steinbruch Eberstadt) der Kluftschar 1.

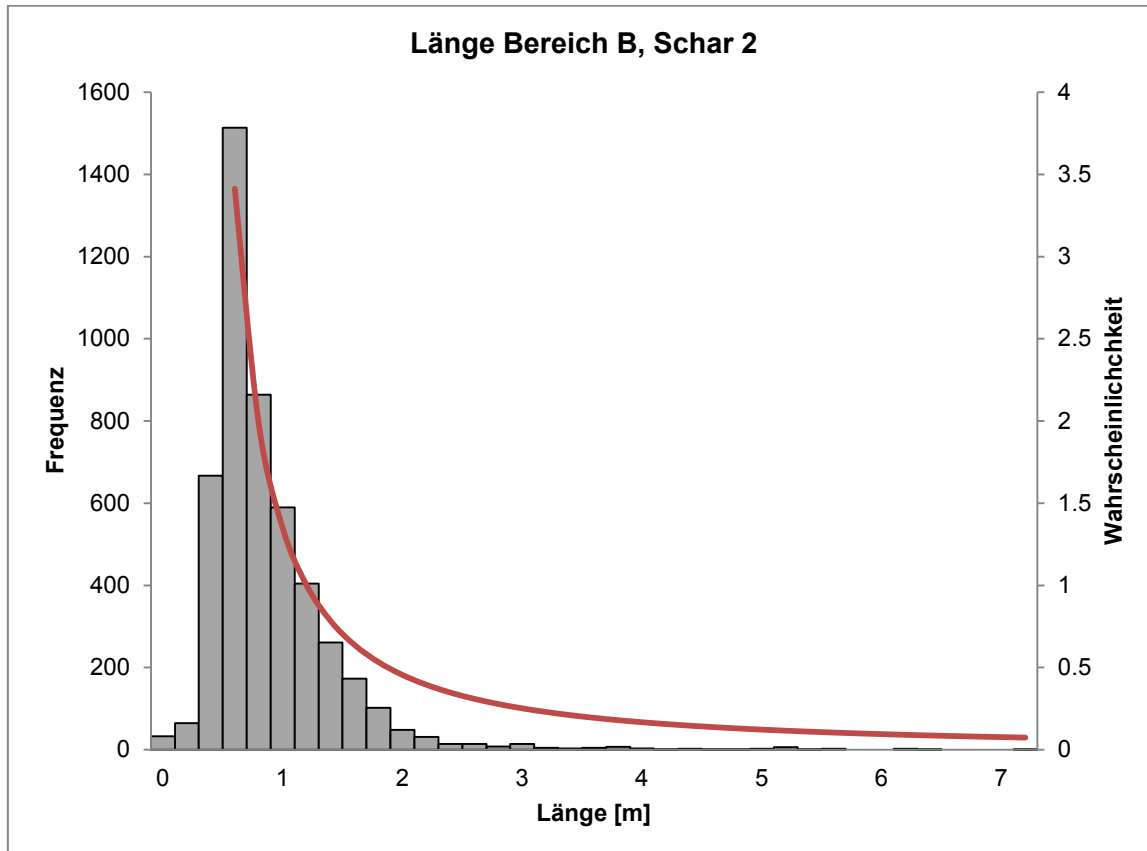


Abbildung 11.25 Histogramm der Längen im Bereich B (Steinbruch Eberstadt) der Kluftschar 2.



***Erklärung***

Hiermit versichere ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus anderen Schriften entnommen sind, sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht als Prüfungsarbeit eingereicht worden.

Darmstadt, den



# Curriculum Vitae

---

Dennis Laux

## Wissenschaftlicher Werdegang

---

- 03/2012 – 12/2015**      Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Ingenieurgeologie des Instituts für Angewandte Geowissenschaften der Technischen Universität Darmstadt
- 10/2009 – 01/2012**      Studium Europäisches Masterprogramm  
„**Geosciences of Basins and Lithosphere**“ (Basinmaster)  
an der RWTH Aachen
- 08/2010 – 01/2011**      Studium an der „Universitetet i Bergen“ in Norwegen im  
Rahmen des Masterprogramms Basinmaster
- 10/2006 – 09/2009**      Studium **Georessourcenmanagement**  
an der RWTH Aachen
- 10/2004 – 09/2006**      Studium Wirtschaftsingenieurwesen Fachrichtung Bauwesen an der RWTH  
Aachen
- 07/1994 – 06/2003**      Städt. Görres Gymnasium Düsseldorf,  
Abschluss Abitur